

CENTRO UNIVERSITÁRIO FEI  
ALINE GENERICH ZACARELLI

**IMPLEMENTAÇÃO DE MODELOS PARA ANÁLISE DE DISPERSÃO GASOSA NA  
ATMOSFERA UTILIZANDO A FERRAMENTA *ASPEN CUSTOM MODELER*  
(ACM)**

São Bernardo do Campo

2019

CENTRO UNIVERSITÁRIO FEI  
ALINE GENERICH ZACARELLI

**IMPLEMENTAÇÃO DE MODELOS PARA ANÁLISE DE DISPERSÃO GASOSA NA  
ATMOSFERA UTILIZANDO A FERRAMENTA *ASPEN CUSTOM MODELER*  
(ACM)**

Dissertação de Mestrado apresentado ao Centro  
Universitário FEI, como parte dos requisitos  
necessários para obtenção do título de Mestre  
em Engenharia Química. Orientado pela Prof.<sup>a</sup>  
Dra. Maristhela Passoni de Araújo Marin.

São Bernardo do Campo  
2019

Generich Zacarelli, Aline .

Implementação de modelos para análise de dispersão gasosa na atmosfera utilizando a ferramenta Aspen Custom Modeler (ACM) / Aline Generich Zacarelli. São Bernardo do Campo, 2019.

245 f. : il.

Dissertação - Centro Universitário FEI.

Orientadora: Prof.<sup>a</sup> Dra. Maristhela Passoni de Araújo Marin.

1. Análise de riscos. 2. Cloro. 3. Liberação. 4. Dispersão. 5. ACM. I. Passoni de Araújo Marin, Maristhela, orient. II. Título.

**Aluno:** Aline Generich Zacarelli

**Matrícula:** 417102-1

**Título do Trabalho:** Implementação de modelos para análise de dispersão gasosa na atmosfera utilizando a ferramenta Aspen Custom Modeler (ACM).

**Área de Concentração:** Engenharia Química

**Orientador:** Profª Drª Maristhela Passoni de Araújo Marin

**Data da realização da defesa:** 30/05/2019

**ORIGINAL ASSINADA**

**Avaliação da Banca Examinadora:**

---

---

---

---

---

São Bernardo do Campo,     /     /     .

**MEMBROS DA BANCA EXAMINADORA**

Profª Drª Maristhela Passoni de Araújo Marin

Ass.: \_\_\_\_\_

Prof. Dr. Ivan Carlos Franco

Ass.: \_\_\_\_\_

Profª Drª Meuris Gurgel Carlos da Silva

Ass.: \_\_\_\_\_

A Banca Julgadora acima-assinada atribuiu ao aluno o seguinte resultado:

APROVADO ☒

REPROVADO ☐

**VERSÃO FINAL DA DISSERTAÇÃO**

**APROVO A VERSÃO FINAL DA DISSERTAÇÃO EM QUE  
FORAM INCLUÍDAS AS RECOMENDAÇÕES DA BANCA  
EXAMINADORA**

Aprovação do Coordenador do Programa de Pós-graduação

\_\_\_\_\_  
Prof. Dr. Ricardo Belchior Torres

Dedico este trabalho a todos aqueles que estiveram ao meu lado durante o período de elaboração e desenvolvimento do mesmo. Especialmente, aos meus pais, amigos e orientadora.

## **AGRADECIMENTOS**

A minha orientadora, Prof.<sup>a</sup> Dra. Maristhela Passoni de Araújo Marin, e ao colaborador, Prof. Dr. Newton Libanio Ferreira, por todo o apoio, dedicação, empenho, tempo e conhecimento compartilhado sem os quais não seria possível a finalização deste trabalho.

Aos meus pais, Silvio Zacrelli Neto e Sonia Regina Generich, que sempre apoiaram minhas decisões e me incentivaram nos momentos de desânimo e dificuldade.

Aos familiares, José Marques da Silva, Maria José Generich Marques e Silvana Zacrelli, por todo encorajamento para elaboração desse trabalho e apoio nos momentos de incômodo.

Aos amigos que estiveram ao meu lado compartilhando conhecimento, apoio e momentos de descontração, em especial aos amigos, Bibiana Martini Domingues da Silva, José Carlos de Andrade Neto, Kevy Pontes Eliodório, Luiz Carlos Domingues da Silva Neto, Marina Saviolli Reis da Silva e Paula Saviolli Nogueira.

Ao Centro Universitário FEI, pela disponibilização da estrutura e recursos essenciais para realização deste trabalho.

## RESUMO

A análise de riscos é realizada em plantas químicas com o intuito de estimar riscos, mensurar a consequência dos mesmos e propor medidas protetivas. Para isso, foram implementados modelos de dispersão na ferramenta *Aspen Custom Modeler* (ACM) do software ASPEN Plus® para analisar o comportamento de uma liberação acidental de cloro na atmosfera. O modelo de dispersão de Pasquill-Gifford foi validado com base em informações da literatura e demonstrou resultados satisfatórios quando comparados aos de *softwares* comerciais, sendo possível realizar análises da dispersão de nuvens tóxicas na atmosfera, como a obtenção do comportamento da concentração média ao longo da distância percorrida pela nuvem e a estimativa da área contaminada pela liberação acidental de cloro por meio das nuvens isocêntricas. Os estudos foram realizados para as liberações contínua e instantânea, ao nível do solo e a uma determinada altura de referência do mesmo, sendo o valor adotado de 4 metros. O limite de toxicidade implementado foi o ERPG – 2, cuja concentração corresponde a 3 ppm. Os resultados mostraram um aumento da concentração média conforme o aumento da estabilidade da atmosfera, o que compromete a taxa de decaimento do cloro, e também uma redução da concentração média de acordo com o aumento da altura de liberação, pois prolonga a trajetória da nuvem tóxica até o solo, promovendo a diluição e dispersão da mesma. A partir das nuvens isocêntricas foi estimada as áreas contaminadas, as quais tendem a aumentar conforme o aumento da estabilidade atmosférica. Para liberação instantânea, foi notado um aumento das áreas contaminadas de acordo com o aumento da altura de liberação da substância tóxica, enquanto que, para liberação contínua, foi observado o comportamento oposto, ou seja, a redução das áreas em relação às liberações ao nível do solo. A maior área contaminada foi estimada para liberação instantânea a 4 metros do solo, considerando a classe de estabilidade “F”, enquanto que a menor área foi obtida para liberação contínua ao nível do solo, levando em conta a classe de estabilidade “A”. O modelo de Britter e McQuaid foi implementado para obter a distância em que ocorre a mudança da flutuabilidade da nuvem tóxica, ou seja, o ponto de transição ( $x_t$ ), os quais foram determinados a 88,5 e 2,1 metros em relação à fonte para liberação instantânea e contínua, respectivamente. Devido à proximidade dos pontos de transição à fonte de liberação foi possível afirmar que a flutuabilidade da nuvem apresentou comportamento predominantemente neutro, o que comprova que o modelo de Pasquill-Gifford apresentou bons resultados para o estudo de caso em questão.

Palavras-chaves: Análise de riscos. Cloro. Liberação. Dispersão. ACM.

## ABSTRACT

The risk analysis is carried out in chemical plants with the purpose of estimating risks, measuring the consequences and proposing protective measures. For this, dispersion models were implemented at Aspen Custom Modeler (ACM) tool of ASPEN Plus® software to analyse the behaviour of an accidental release of chlorine into the atmosphere. The Pasquill-Gifford dispersion model was authenticated based on information from the literature and demonstrated satisfactory results when compared with the results of commercial software, being possible to carry out analyses of the dispersion of toxic clouds into the atmosphere, such as obtaining the behaviour of the average concentration as a function of distance and to estimate the contaminated area by the accidental release of chlorine by isopleths. The studies were carried out for continuous and instantaneous releases, at ground level and at a certain reference height, being adopted a value of 4 meters. The toxicity limit implemented was ERPG - 2, whose concentration corresponds to 3 ppm. Results shows an increase of the average concentration according to the increasing of atmosphere stability, which compromises the chlorine decay rate, and the decreasing of average concentration according to releasing height, because it prolongs the trajectory of the toxic cloud to the ground, promoting the dilution and dispersion. From the isopleths was estimated a contaminated area, which tend to expand according to the increase of atmosphere stability. For instant release was noticed an increase of the contaminated areas according to the height of the release of the toxic substance, while for continuous release, was observed the opposite behaviour, that is, a reduction of the area in relation to release at the ground level. The highest contaminated area was estimated for instantaneous release at a 4 meters from the ground, considering the "F" class of stability, while the smaller area was obtained for the continuous release on the ground, considering the stability class "A". The Britter and McQuaid model was implemented to obtain the transition point ( $x_t$ ), which were determined at 88,5 and 2,1 meters in relation to the source for instantaneous and continuous release, respectively. Due to the proximity of the transition points to the release source, it was possible to affirm that the cloud buoyancy presented predominantly neutral behaviour, which proves that the Pasquill-Gifford model presented the good results for this case study.

Keywords: Risk analysis. Chlorine Release. Dispersion and ACM.



## LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 – Procedimento para construção de análise de riscos .....	29
Figura 2 – Método de identificação de perigo <i>Checklist</i> .....	30
Figura 3 – Árvore de eventos para o cenário de perda de resfriamento em um reator.....	40
Figura 4 – Componentes de função lógica usados em uma Árvore de Falhas .....	42
Figura 5 – Sistema de recebimento e distribuição .....	43
Figura 6 – Árvore de Falhas para explosão de um receptor de ar .....	43
Figura 7 – <i>Layer of Protection Analysis</i> para reduzir a frequência de um acidente.....	45
Figura 8 – Correlação de Britter e McQuaid para liberação contínua (pluma) de gás denso.	59
Figura 9 – Correlação de Britter e McQuaid para liberação instantânea ( <i>puff</i> ) de gás denso	61
Figura 10 – Esquema da transição da dispersão de gás denso para gás de fluabilidade neutra .....	65
Figura 11 – Produtos obtidos a partir de reações utilizando cloro .....	81
Figura 12 – Nuvem isocêntrica da validação do modelo de dispersão de Pasquill-Gifford...	105
Figura 13 – Comportamento da concentração em função da distância para liberação instantânea ao nível do solo, considerando a classe de estabilidade “A” .....	107
Figura 14 – Comportamento da concentração em função da distância para liberação contínua ao nível do solo, considerando a classe de estabilidade “A” .....	108
Figura 15 – Comportamento da concentração em função da distância para liberação instantânea ao nível do solo, considerando a classe de estabilidade “B” .....	109
Figura 16 – Comportamento da concentração em função da distância para liberação contínua ao nível do solo, considerando a classe de estabilidade “B” .....	110
Figura 17 – Comportamento da concentração em função da distância para liberação instantânea ao nível do solo, considerando a classe de estabilidade “C” .....	111
Figura 18 – Comportamento da concentração em função da distância para liberação contínua ao nível do solo, considerando a classe de estabilidade “C” .....	112
Figura 19 – Comportamento da concentração em função da distância para liberação instantânea ao nível do solo, considerando a classe de estabilidade “D” .....	113
Figura 20 – Comportamento da concentração em função da distância para liberação contínua ao nível do solo, considerando a classe de estabilidade “D” .....	114
Figura 21 – Comportamento da concentração em função da distância para liberação instantânea ao nível do solo, considerando a classe de estabilidade “E” .....	115

Figura 22 – Comportamento da concentração em função da distância para liberação contínua ao nível do solo, considerando a classe de estabilidade “E” .....	116
Figura 23 – Comportamento da concentração em função da distância para liberação instantânea ao nível do solo, considerando a classe de estabilidade “F” .....	117
Figura 24 – Comportamento da concentração em função da distância para liberação contínua ao nível do solo, considerando a classe de estabilidade “F” .....	118
Figura 25 – Comportamento da concentração em função da distância para liberação a 4 metros do nível do solo, considerando a classe de estabilidade “A” .....	119
Figura 26 – Comportamento da concentração em função da distância para liberação a 4 metros do nível do solo, considerando a classe de estabilidade “B” .....	121
Figura 27 – Comportamento da concentração em função da distância para liberação a 4 metros do nível do solo, considerando a classe de estabilidade “C” .....	122
Figura 28 – Comportamento da concentração em função da distância para liberação a 4 metros do nível do solo, considerando a classe de estabilidade “D” .....	123
Figura 29 – Comportamento da concentração em função da distância para liberação a 4 metros do nível do solo, considerando a classe de estabilidade “E” .....	124
Figura 30 – Comportamento da concentração em função da distância para liberação a 4 metros do nível do solo, considerando a classe de estabilidade “F” .....	126
Figura 31 – Estimativa da área contaminada por meio da nuvem isocêntrica obtida para liberação instantânea ao nível do solo .....	128
Figura 32 – Estimativa da área contaminada por meio da nuvem isocêntrica obtida para liberação contínua ao nível do solo .....	129
Figura 33 – Estimativa da área contaminada por meio da nuvem isocêntrica obtida para liberação instantânea a 4 metros do solo .....	130
Figura 34 – Estimativa da área contaminada por meio da nuvem isocêntrica obtida para liberação contínua a 4 metros do solo .....	132
Figura 35 – Criação de um arquivo no <i>software</i> ASPEN Plus® .....	146
Figura 36 – Criação da lista de componentes presentes no cenário acidental.....	147
Figura 37 – Sincronização do arquivo do <i>software</i> ASPEN Plus® à ferramenta ACM .....	147
Figura 38 – Criação do modelo de dispersão para liberação instantânea ( <i>puff</i> ).....	148
Figura 39 – Implementação do modelo de dispersão no ACM para liberação instantânea....	149
Figura 40 – Implementação do modelo de dispersão para construção da nuvem isocêntrica	152
Figura 41 – Primeira parte da implementação do modelo de dispersão de gás denso no ACM .....	154

Figura 42 – Segunda parte da implementação do modelo de dispersão de gás denso no ACM .....	155
Figura 43 – Primeira parte da implementação do modelo de transição de flutuabilidade para liberação instantânea no ACM.....	157
Figura 44 – Segunda parte da implementação do modelo de transição de flutuabilidade para liberação instantânea no ACM.....	158
Figura 45 – Terceira parte da implementação do modelo de transição da flutuabilidade para liberação instantânea no ACM.....	159
Figura 46 – Quarta parte da implementação do modelo de transição da flutuabilidade para liberação instantânea no ACM.....	160

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Método de identificação de perigo <i>What if</i> .....	31
Tabela 2 – Exemplo de uma planilha de APP .....	32
Tabela 3 – Categorias de severidade .....	32
Tabela 4 – Termos específicos utilizados no HAZOP e seus significados .....	33
Tabela 5 – Palavras-guias utilizada na metodologia HAZOP .....	36
Tabela 6 – Palavras-guia associadas à variável tempo .....	37
Tabela 7 – Planilha para a realização do Estudo de Perigo e Operabilidade (HAZOP).....	38
Tabela 8 – Parâmetros meteorológicos para o Modelo de Sutton .....	51
Tabela 9 – Classes de estabilidade atmosférica usadas com o modelo de Pasquill-Gifford ..	52
Tabela 10 – Determinação dos coeficientes de dispersão para liberação contínua (pluma) ....	53
Tabela 11 – Determinação dos coeficientes de dispersão para liberação instantânea ( <i>puff</i> )....	53
Tabela 12 – Equações das correlações Britter e McQuaid para liberação contínua (pluma) ...	60
Tabela 13 – Equações das correlações Britter e McQuaid para liberação instantânea ( <i>puff</i> )...	62
Tabela 14 – Determinação do tipo de liberação de gás denso .....	63
Tabela 15 – Valores de ERPGs para diversos compostos químicos, em ppm .....	75
Tabela 16 – Valores de EEGLs para diversos compostos químicos, em ppm .....	76
Tabela 17 – Valores de ponto final tóxico para alguns compostos químicos.....	77
Tabela 18 – Propriedades físicas do cloro .....	78
Tabela 19 – Informações a respeito do acidente de Festus.....	85
Tabela 20 – Análise da concentração média de cloro utilizando diferentes <i>softwares</i> .....	85
Tabela 21 – Análise da distância atingida pela nuvem de cloro para diferentes <i>softwares</i> .....	86
Tabela 22 – Análise da largura atingida pela nuvem de cloro para diferentes <i>softwares</i> .....	86
Tabela 23 – Análise da altura atingida pela nuvem de cloro para diferentes <i>softwares</i> .....	86
Tabela 24 – Influência da velocidade do vento na dispersão da nuvem tóxica.....	88
Tabela 25 – Influência da temperatura na dispersão da nuvem tóxica .....	88
Tabela 26 – Influência da rugosidade da superfície na dispersão da nuvem tóxica .....	89
Tabela 27 – Metodologia para a implementação do modelo de dispersão de Pasquill-Gifford .....	94
Tabela 28 – Metodologia para a construção das nuvens isocêntricas .....	97
Tabela 29 – Variáveis utilizadas no modelo de dispersão de Britter e McQuaid.....	99
Tabela 30 – Metodologia para implementação do modelo de dispersão de Britter e McQuaid .....	101

Tabela 31 - Metodologia para implementação do modelo de transição .....	102
Tabela 32 – Resultados obtidos para <i>softwares</i> de análise de riscos distintos .....	106
Tabela 33 – Áreas contaminadas conforme a liberação e classe de estabilidade atmosférica	133
Tabela 34 – Dados para construção da nuvem isocêntrica referente ao acidente de Festus, Missouri .....	162
Tabela 35 – Análise da concentração em função da distância para liberação instantânea ao nível do solo para a classe de estabilidade “A” .....	165
Tabela 36 – Análise da concentração em função da distância para liberação instantânea ao nível do solo para a classe de estabilidade “B” .....	167
Tabela 37 – Análise da concentração em função da distância para liberação instantânea ao nível do solo para a classe de estabilidade “C” .....	169
Tabela 38 – Análise da concentração em função da distância para liberação instantânea ao nível do solo para a classe de estabilidade “D” .....	171
Tabela 39 – Análise da concentração em função da distância para liberação instantânea ao nível do solo para a classe de estabilidade “E” .....	173
Tabela 40 – Análise da concentração em função da distância para liberação instantânea ao nível do solo para a classe de estabilidade “F” .....	175
Tabela 41 – Análise da concentração em função da distância para liberação instantânea 4 metros do solo para a classe de estabilidade “A” .....	177
Tabela 42 – Análise da concentração em função da distância para liberação instantânea 4 metros do solo para a classe de estabilidade “B” .....	179
Tabela 43 – Análise da concentração em função da distância para liberação instantânea 4 metros do solo para a classe de estabilidade “C” .....	181
Tabela 44 – Análise da concentração em função da distância para liberação instantânea 4 metros do solo para classe de estabilidade “D” .....	183
Tabela 45 – Análise da concentração em função da distância para liberação instantânea 4 metros do solo para classe de estabilidade “E” .....	185
Tabela 46 – Análise da concentração em função da distância para liberação instantânea 4 metros do solo para classe de estabilidade “F” .....	187
Tabela 47 – Análise da concentração em função da distância para liberação contínua ao nível do solo para classes de estabilidade “A” e “B” .....	189
Tabela 48 – Análise da concentração em função da distância para liberação contínua ao nível do solo para a classe de estabilidade “C” .....	191

Tabela 49 – Análise da concentração em função da distância para liberação contínua ao nível do solo para a classe de estabilidade “D” .....	193
Tabela 50 – Análise da concentração em função da distância para liberação contínua ao nível do solo para as classes de estabilidade “E” e “F” .....	195
Tabela 51 – Análise da concentração em função da distância para liberação contínua 4 metros do solo para as classes de estabilidade “A” e “B” .....	197
Tabela 52 – Análise da concentração em função da distância para liberação contínua 4 metros solo para a classe de estabilidade “C” .....	199
Tabela 53 – Análise da concentração em função da distância para liberação contínua 4 metros do solo para a classe de estabilidade “D” .....	201
Tabela 54 – Análise da concentração em função da distância para liberação contínua 4 metros solo para as classes de estabilidade “E” e “F” .....	203
Tabela 55 – Dados para construção da nuvem isocêntrica referente à liberação instantânea ( <i>puff</i> ) ao nível do solo para a classe de estabilidade “A” .....	206
Tabela 56 – Dados para construção da nuvem isocêntrica referente à liberação instantânea ( <i>puff</i> ) ao nível do solo para a classe de estabilidade “D” .....	207
Tabela 57 – Dados para construção da nuvem isocêntrica referente à liberação instantânea ( <i>puff</i> ) ao nível do solo para a classe de estabilidade “F” .....	209
Tabela 58 – Dados para construção da nuvem isocêntrica referente à liberação instantânea ( <i>puff</i> ) a 4 metros do nível do solo para a classe de estabilidade “A” .....	221
Tabela 59 – Dados para construção da nuvem isocêntrica referente à liberação instantânea ( <i>puff</i> ) a 4 metros do nível do solo para a classe de estabilidade “D” .....	224
Tabela 60 – Dados para construção da nuvem isocêntrica referente à liberação instantânea ( <i>puff</i> ) a 4 metros do nível do solo para a classe de estabilidade “F” .....	231
Tabela 61 – Dados para construção da nuvem isocêntrica referente à liberação contínua (pluma) ao nível do solo para a classe de estabilidade “A” .....	239
Tabela 62 – Dados para construção da nuvem isocêntrica referente à liberação contínua (pluma) ao nível do solo para a classe de estabilidade “D” .....	240
Tabela 63 – Dados para construção da nuvem isocêntrica referente à liberação contínua (pluma) ao nível do solo para a classe de estabilidade “F” .....	241
Tabela 64 – Dados para construção da nuvem isocêntrica referente à liberação contínua (pluma) a 4 metros do nível do solo para a classe de estabilidade “A” .....	243
Tabela 65 – Dados para construção da nuvem isocêntrica referente à liberação contínua (pluma) a 4 metros do nível do solo para a classe de estabilidade “D” .....	244

Tabela 66 – Dados para construção da nuvem isocêntrica referente à liberação contínua (pluma) a 4 metros do nível do solo para a classe de estabilidade “F” .....	245
--	-----

## LISTA DE ABREVIACÕES

ACM	<i>Aspen Modeler Custom</i>
ALOHA	<i>Areal Locations of Hazardous Atmospheres</i>
APP	Análise preliminar de perigo
AQR	Análise quantitativa de riscos
ATC	<i>Acute Toxic Concentration</i>
BLEVE	<i>Boiling Liquid Expanding Vapor Explosions</i>
CETESB	Companhia Ambiental do Estado de São Paulo
CFD	<i>Computational Fluid Dynamics</i>
CL50	<i>Median Lethal Concentration</i>
DEGADIS	<i>Dense Gas Dispersion</i>
EEGL	<i>Emergency Exposure Guidance Levels</i>
EPA	<i>Environmental Protection Agency</i>
ERPG	<i>Emergency Response Planning Guideline</i>
HAZOP	<i>Hazards and Operability Studies</i>
IDLH	<i>Immediately Dangerous to Life and Health</i>
LCLO	<i>Lowest Reported Lethal Concentration</i>
LOC	<i>Limiting Oxygen Concentration</i>
LOPA	<i>Layer of Protection Analysis</i>
MIC	Isocianato de metila
PHA	<i>Preliminary Hazard Analysis</i>
PVC	Policloreto de vinila
SPEGL	<i>Short Term Public Exposure Guideline</i>
TCA	Tricloroamina
TCDD	2, 3, 7, 8 – tetraclorodibenzenoparadioxina
TCP	Triclorofenol
TLV – Cs	<i>Ceiling Concentration</i>
TLV	<i>Threshold Limit Value</i>
TLV-STEL	<i>Short-term Exposure Limits</i>
TXDS	<i>Toxic Dispersion Method</i>



## LISTA DE VARIÁVEIS

$\alpha$	Parâmetro de Britter e McQuaid para liberação instantânea e contínua
$\beta$	Parâmetro de Britter e McQuaid para liberação instantânea e contínua
$\bar{C}$	Concentração média ( $\text{kg.m}^{-3}$ )
$C$	Parâmetro de Difusão ( $m^{1/8}$ )
$C_0$	Concentração da fonte de liberação ( $\text{kg.m}^{-3}$ )
$C_l$	Concentração do líquido presente na nuvem liberada ( $\text{kg.m}^{-3}$ )
$C_m$	Concentração do limite de toxicidade ( $\text{kg.m}^{-3}$ )
$C'_m$	Concentração do limite de toxicidade corrigido para liberação não isotérmica ( $\text{kg.m}^{-3}$ )
$Cr_1$	Critério de flutuabilidade
$Cr_2$	Critério de liberação
$C_v$	Concentração do vapor liberado ( $\text{kg.m}^{-3}$ )
$C_x$	Concentração no ponto $x$ a partir da fonte de liberação ( $\text{kg.m}^{-3}$ )
$C_x$	Parâmetro de Difusão correspondente a coordenada $x$ ( $m^{1/8}$ )
$C_y$	Parâmetro de Difusão correspondente a coordenada $y$ ( $m^{1/8}$ )
$C_z$	Parâmetro de Difusão correspondente a coordenada $z$ ( $m^{1/8}$ )
$c_5$	Constante
$c_p$	Calor específico da nuvem ( $\text{J.kg}^{-1}.\text{°C}^{-1}$ )
$c_{pa}$	Calor específico do ar ( $\text{J.kg}^{-1}.\text{°C}^{-1}$ )
$c_{pn}$	Calor específico do gás liberado ( $\text{J.kg}^{-1}.\text{°C}^{-1}$ )
$D_{cx}$	Dimensão da fonte de liberação contínua no ponto $x$ (m)
$D_{ix}$	Dimensão da fonte de liberação instantânea no ponto $x$ (m)
$D_c$	Dimensão da fonte para liberação contínua de gás denso (m)
$D_i$	Dimensão da fonte para liberação instantânea de gás denso (m)
$G$	Vetor da aceleração gravitacional ( $\text{m.s}^2$ )
$g$	Aceleração da gravidade ( $\text{m.s}^{-1}$ )
$g_0$	Empuxo inicial da nuvem ( $\text{m.s}^{-2}$ )
$g_x$	Empuxo da nuvem no ponto $x$ a partir da fonte de liberação ( $\text{m.s}^{-2}$ )
$K^c$	Vetor do coeficiente turbulento específico da nuvem ( $\text{m.s}^{-1}$ )
$K^m$	Vetor do coeficiente turbulento específico ( $\text{m.s}^{-1}$ )
$K^\theta$	Vetor do coeficiente turbulento específico da temperatura ( $\text{m.s}^{-1}$ )

$h$	Altura de referência (m)
$K$	Coefficiente de Difusão de Fickian ( $\text{m}^2.\text{s}^{-1}$ )
$K_j$	Difusividade de Turbilhão ( $\text{m}^2.\text{s}$ )
$K_x$	Coefficiente de Difusão de Fickian correspondente a coordenada $x$ ( $\text{m}^2.\text{s}^{-1}$ )
$K_y$	Coefficiente de Difusão de Fickian correspondente a coordenada $y$ ( $\text{m}^2.\text{s}^{-1}$ )
$K_z$	Coefficiente de Difusão de Fickian correspondente a coordenada $z$ ( $\text{m}^2.\text{s}^{-1}$ )
$l$	Profundidade da nuvem (m)
$L_c$	Calor de vaporização ( $\text{J.kg}^{-1}$ )
$M$	Peso molecular da nuvem ( $\text{kg.kmol}^{-1}$ )
$M_a$	Peso molecular do ar ( $\text{kg.kmol}^{-1}$ )
$M_g$	Peso molecular do vapor ( $\text{kg.kmol}^{-1}$ )
$n$	Índice de difusão
$p$	Pressão da nuvem (Pa)
$p_a$	Pressão atmosférica (Pa)
$Q$	Fluxo mássico ( $\text{kg.s}^{-1}$ )
$Q_m$	Fluxo mássico ( $\text{kg.s}^{-1}$ )
$Q^*$	Massa liberada (kg)
$Q_m^*$	Massa liberada (kg)
$q_0$	Fluxo volumétrico inicial para dispersão de gás denso ( $\text{m}^3.\text{s}^{-1}$ )
$q_x$	Fluxo volumétrico no ponto $x$ a partir da fonte de liberação ( $\text{m}^3.\text{s}$ )
$R_d$	Duração da liberação (s)
$R_*$	Constante universal dos gases ( $\text{Pa.m}^3.\text{mol}^{-1}.\text{K}^{-1}$ )
$R_{ia}$	Número de Richardson
$T_0$	Temperatura da fonte absoluta (K)
$T_a$	Temperatura ambiente absoluta (K)
$T$	Temperatura absoluta (K)
$t$	Tempo (s)
$U_c$	Vetor da velocidade da nuvem ( $\text{m.s}^{-1}$ )
$u$	Velocidade do vento ( $\text{m.s}^{-1}$ )
$u_*$	Velocidade de atrito ( $\text{m.s}^{-1}$ )
$V_0$	Volume inicial do gás denso liberado ( $\text{m}^3$ )
$V_x$	Volume do gás no ponto $x$ a partir da fonte de liberação ( $\text{m}^3$ )
$x$	Distância (m)

$x_{nb}$	Distância utilizada no modelo de flutuabilidade neutra para calcular a concentração na transição (m)
$x_t$	Ponto de transição (m)
$x_v$	Distância virtual (m)
$w_*$	Velocidade de convecção ( $\text{m.s}^{-1}$ )
$y$	Distância (m)
$y_0$	Limite da nuvem correspondente a coordenada $y$ (m)
$z$	Altura (m)
$z_0$	Limite da nuvem correspondente a coordenada $z$ (m)
$\rho_c$	Densidade da nuvem ( $\text{kg.m}^{-3}$ )
$\rho_x$	Densidade no ponto $x$ a partir da fonte de liberação ( $\text{kg.m}^{-3}$ )
$\rho_0$	Densidade inicial do material liberado ( $\text{kg.m}^{-3}$ )
$\rho_a$	Densidade do ar ambiente ( $\text{kg.m}^{-3}$ )
$\sigma_x$	Coefficiente de Difusividade correspondente a coordenada $x$ (m)
$\sigma_y$	Coefficiente de Difusividade correspondente a coordenada $y$ (m)
$\sigma_z$	Coefficiente de Difusividade correspondente a coordenada $z$ (m)
$\theta$	Desvio da temperatura potencial (K)
$\varphi$	Função empírica

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO</b>	22
<b>2</b>	<b>OBJETIVOS</b>	24
2.1	OBJETIVO GERAL	24
2.2	OBJETIVOS ESPECÍFICOS	24
<b>3</b>	<b>REVISÃO BIBLIOGRÁFICA</b>	25
3.1	CONCEITO DE PERIGO E RISCO	25
3.2	ANÁLISE HISTÓRICA DE ACIDENTES	25
3.2.1	Flixborough, Inglaterra	26
3.2.2	Bhopal, Índia	26
3.2.3	Graniteville, Carolina do Sul	27
3.2.4	Carmen del Paraná, Paraguai	27
3.2.5	Maceió, Brasil	28
3.3	METODOLOGIAS DE IDENTIFICAÇÃO DE RISCOS	28
3.3.1	<i>Checklist</i>	30
3.3.2	<i>What if</i>	31
3.3.3	<i>Análise Preliminar de Perigos (APP)</i>	31
3.3.4	<i>Estudo de perigos e operabilidade (HAZOP)</i>	33
3.4	METODOLOGIAS PARA QUANTIFICAÇÃO DE RISCOS	39
3.4.1	Análise quantitativa de riscos (AQR)	39
3.4.1.1	<i>Árvore de Eventos</i>	39
3.4.1.2	<i>Árvore de Falhas</i>	41
3.4.1.3	<i>Análise da Camada de Proteção (LOPA)</i>	44
3.5	MODELAGEM MATEMÁTICA PARA DISPERSÃO ATMOSFÉRICA	46
3.5.1	Modelos de dispersão neutro flutuante	47
3.5.1.1	<i>Modelo de Roberts</i>	48
3.5.1.2	<i>Modelo de Sutton</i>	50
3.5.1.3	<i>Modelo de Pasquill-Gifford</i>	51
3.5.2	Modelo de dispersão para gases densos	57
3.5.2.1	<i>Modelos Empíricos</i>	57
3.5.2.1.1	<i>Transição da Dispersão de Gás Denso para Gás de Flutuabilidade Neutra</i>	65
3.5.2.2	<i>Modelos de engenharia</i>	68
3.5.2.2.1	<i>Modelos de caixa para lançamentos instantâneos</i>	68

3.5.2.2.2	<i>Modelos de pluma uniforme ou gaussianas</i> .....	68
3.5.2.2.3	<i>Modelos de pluma generalizada</i> .....	69
3.5.2.2.4	<i>Modelos de jatos integrais</i> .....	69
3.5.2.2.5	<i>Modelos de camada superficial</i> .....	69
3.5.2.3	<b>Modelos de pesquisa</b> .....	70
3.5.3	<b>Condições de pior caso (<i>Worst Case</i>)</b> .....	72
3.5.4	<b>Parâmetros que afetam a dispersão</b> .....	73
3.5.5	<b>Critérios de Efeito Tóxico</b> .....	74
3.6	<b>USO E PRODUÇÃO DO CLORO</b> .....	78
3.6.1	<b>Propriedades físico-químicas</b> .....	78
3.6.2	<b>Utilização</b> .....	80
3.6.3	<b>Sistemas de Armazenamento</b> .....	81
3.7	<b>ESTUDOS DE DISPERSÃO DE CLORO NA ATMOSFERA</b> .....	82
4	<b>METODOLOGIA</b> .....	90
4.1	<b>DEFINIÇÃO DA SUBSTÂNCIA QUÍMICA ENVOLVIDA NO ESTUDO DE CASO</b> .....	90
4.2	<b>DEFINIÇÃO DOS MODELOS DE DISPERSÃO</b> .....	90
4.3	<b>DEFINIÇÃO DO <i>SOFTWARE</i> UTILIZADO</b> .....	91
4.4	<b>IMPLEMENTAÇÃO DO MODELO DE DISPERSÃO DE PASQUILL-GIFFORD NO ACM</b> .....	91
4.5	<b>CONSTRUÇÃO DAS NUVENS ISOCÊNTRICAS</b> .....	95
4.6	<b>IMPLEMENTAÇÃO DO MODELO DE DISPERSÃO DE BRITTER E MCQUAID NO ACM</b> .....	97
4.7	<b>SIMULAÇÃO DOS ESTUDOS DE CASOS OBTIDOS NA LITERATURA</b> ....	103
5	<b>RESULTADOS E DISCUSSÃO</b> .....	104
5.1	<b>ANÁLISE DOS ESTUDOS DE CASOS OBTIDOS NA LITERATURA</b> .....	104
5.2	<b>ANÁLISE DO COMPORTAMENTO DA CONCENTRAÇÃO MÉDIA AO LONGO DA DISTÂNCIA</b> .....	106
5.3	<b>ANÁLISE DA ÁREA CONTAMINADA UTILIZANDO AS NUVENS ISOCÊNTRICAS</b> .....	127
5.4	<b>ANÁLISE DA FLUTUABILIDADE DO GÁS</b> .....	134
6	<b>CONCLUSÃO</b> .....	136
	<b>REFERÊNCIAS</b> .....	140

<b>APÊNDICE A – Implementação do modelo de dispersão para liberação instantânea.....</b>	<b>145</b>
<b>APÊNDICE B – Construção da nuvem isocêntrica para liberação instantânea.....</b>	<b>150</b>
<b>APÊNDICE C – Implementação do modelo de dispersão de gás denso para liberação instantânea.....</b>	<b>153</b>
<b>APÊNDICE D – Implementação do modelo de transição da flutuabilidade para liberação instantânea.....</b>	<b>156</b>
<b>APÊNDICE E – Dados utilizados na validação do modelo de dispersão de Pasquill-Gifford .....</b>	<b>161</b>
<b>APÊNDICE F – Dados do comportamento da concentração em função da distância .....</b>	<b>164</b>
<b>APÊNDICE G – Dados para construção das nuvens isocêntricas.....</b>	<b>205</b>

## 1 INTRODUÇÃO

Nas últimas décadas, o aumento de plantas industriais nas cidades de todo o mundo proporcionou a expansão do mercado de trabalho e, consequentemente, a melhoria na qualidade de vida da população que ali vive. No entanto, elevou o número de incidentes e acidentes industriais, além de comprometer a segurança das pessoas e do ecossistema no entorno dessas plantas químicas.

O aumento de acidentes em indústrias químicas e petroquímicas conscientizou trabalhadores e empresas que passaram a buscar por técnicas de redução e eliminação de riscos. Entre elas, algumas já eram utilizadas em indústrias bélicas, aeronáuticas e nucleares, mas sofreram modificações com o intuito de serem implementadas em outras indústrias, em particular, nas áreas de petróleo, químicas e petroquímicas (COMPANHIA AMBIENTAL DO ESTADO DE SÃO PAULO, 2011).

Nesse contexto, o risco é definido como o produto entre a probabilidade de ocorrência de um acidente e a magnitude das consequências resultantes do evento sobre as pessoas, ambiente e empresa. O risco real de uma planta é mensurado a partir da análise quantitativa de riscos (AQR) e é empregado quando os métodos qualitativos não fornecem compreensão adequada dos riscos (CROWL; LOUVAR, 2002).

As plantas químicas contêm uma grande variedade de perigos, sendo estes classificados em perigos mecânicos e perigos químicos. Os perigos mecânicos estão atrelados aos riscos de lesão a operários devido a tropeços, quedas ou movimentação de equipamentos. Já os perigos químicos incluem riscos de incêndio e explosão, riscos de reatividade e riscos tóxicos, como liberação de substâncias química.

De acordo com Pontiggia et al. (2009), os acidentes relacionados à liberação de substâncias químicas tóxicas ou inflamáveis são as principais preocupações na análise de risco de uma planta química, uma vez que a nuvem tóxica pode atingir grandes distâncias, comprometendo a saúde da população e prejudicando o meio ambiente.

Algumas substâncias químicas requerem uma análise de riscos minuciosa, entre as quais se destacam o cloro e a amônia, em razão à característica tóxica dessas substâncias, e também o gás liquefeito de petróleo (GLP), em virtude de sua inflamabilidade.

Essas nuvens apresentam densidade superior à densidade do ar e, por isso, são denominadas nuvens densas, as quais exigem maior preocupação, uma vez que a nuvem tóxica tende a se movimentar em direção ao solo, onde há a concentração de pessoas, acarretando na

contaminação e a intoxicação das mesmas e podendo levar a consequências devastadoras (SALAZAR, 2016).

Uma técnica de análise de riscos é realizada com a ajuda de *softwares* que estimam os impactos de acidentes, determinam a área contaminada a partir da aplicação de modelos de dispersão e indicam a concentração da substância liberada em função da distância na direção do vento. Dentre os *freewares* e *softwares* comerciais empregados, os mais utilizados são o TRACE, PHAST, SCIPUFF, SLAB, HGSYSTEM, CFD, ALOHA, RMP\* Comp e DEGADIS.

Embora exista uma variedade de *softwares* desenvolvidos para realizar análise de riscos, muitas empresas não os utilizam devido à necessidade de operadores experientes e com conhecimentos específicos na área de mecânica dos fluidos e também pelo elevado valor da aquisição do *software*.

Os *freewares*, entretanto, são *softwares* mais simplificados e exigem menos dados de entrada por não contemplarem condições de contorno muito abrangentes, o que resulta em previsões pouco confiáveis.

Este trabalho procura fornecer uma alternativa para a realização da análise de riscos por meio da utilização da ferramenta *Aspen Custom Modeler* (ACM) do *software* ASPEN Plus®, com a qual foi possível implementar modelos de dispersão para a análise de riscos de liberações de substâncias tóxicas.

O ASPEN Plus® é empregado em muitas empresas do setor químicos e petroquímico para modelar e simular processos e, dessa maneira, a utilização da ferramenta ACM para a realização da análise de riscos representaria uma aplicação inovadora para o *software*.



## 2 OBJETIVOS

Diversas atividades industriais operam com substâncias químicas e inflamáveis, trazendo consigo riscos de incêndio, explosão e liberação indesejada de substâncias tóxicas, as quais são responsáveis pelos danos mais sérios. Assim como a identificação de perigos, mensurar as consequências de acidentes também é uma preocupação. Neste contexto, são propostos os objetivos geral e específicos do trabalho.

### 2.1 OBJETIVO GERAL

O presente trabalho teve como objetivo desenvolver uma alternativa para a realização de análise de riscos utilizando a ferramenta *Aspen Custom Modeler* (ACM), do *software* ASPEN PLUS®, no qual foram implementados modelos de dispersão de gases na atmosfera para avaliar o comportamento de liberação acidental de substância tóxica.

### 2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- a) Selecionar a substância química para estudo de caso;
- b) Analisar e escolher o modelo de dispersão de gases para flutuabilidade neutra;
- c) Implementar os modelos de dispersão de gases na atmosfera para liberações contínuas e instantâneas ao nível do solo;
- d) Implementar os modelos de dispersão de gases na atmosfera para liberações contínuas e instantâneas a uma altura de referência do nível do solo;
- e) Avaliar a concentração média do gás tóxico em função da distância do ponto de liberação para as diferentes classes de estabilidade da atmosfera;
- f) Construir as nuvens isocêntricas para liberações contínuas e instantâneas;
- g) Analisar e escolher o modelo de dispersão de gases densos;
- h) Implementar o modelo de dispersão de gases densos.

### 3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Nesta seção, são apresentados os conceitos teóricos para a elaboração de uma análise quantitativa de riscos (AQR) em uma planta química. Para isso, foram definidos os conceitos de perigo e risco, descritas as metodologias de identificação e de quantificação de risco, apresentados os modelos de dispersão gasosa e realizada uma análise histórica dos acidentes industriais.

#### 3.1 CONCEITO DE PERIGO E RISCO

Segundo a Companhia Ambiental do Estado de São Paulo (2011), os perigos são definidos como condições físicas ou químicas inerentes a uma substância, instalação, atividade ou procedimento, com potencial de causar danos às pessoas, propriedades ou ao meio ambiente.

O risco representa a frequência de um perigo se materializar causando danos humanos, ambientais ou econômicos, sendo definido como uma função da frequência de ocorrência de um cenário acidental e os efeitos físicos associados à exposição do mesmo, como pode ser observado na Equação (1).

$$Risco \left[ \frac{\text{consequência}}{\text{tempo}} \right] = Frequência \left[ \frac{\text{evento}}{\text{tempo}} \right] \cdot Magnitude \left[ \frac{\text{consequência}}{\text{evento}} \right] \quad (1)$$

O perigo é uma condição específica e inevitável, no entanto, o risco pode ser quantificado e minimizado ao implementar medidas de proteção.

#### 3.2 ANÁLISE HISTÓRICA DE ACIDENTES

De acordo com a Companhia Ambiental do Estado de São Paulo (2011), os acidentes industriais ocorridos nos últimos anos, especialmente os durante a década de 1980, acabaram por ter a função de alertar as autoridades governamentais, as indústrias e a sociedade a respeito da necessidade do emprego de técnicas que busquem evitar acidentes, promover a segurança da população e proteger a qualidade do meio ambiente.

Dentre os acidentes industriais que ocorreram nos últimos 40 anos, o de Flixborough e Bophal foram essenciais no desenvolvimento de metodologias para redução e eliminação de riscos, descritos a seguir junto de outros acidentes registrados em literatura específica.

### **3.2.1 Flixborough, Inglaterra**

Segundo Crowl e Louvar (2002), a planta da Nypro Ltda, localizada em Flixborough, Inglaterra, foi projetada para produzir, por ano, 70 mil toneladas de caprolactama, matéria-prima básica para a fabricação de nylon. O processo era realizado em uma instalação com seis reatores conectados em série, nos quais ocorriam a oxidação do ciclohexano em ciclohexanona e, posteriormente, a oxidação da ciclohexanona em ciclohexanol.

De acordo com a Companhia Ambiental do Estado de São Paulo (2018d), no dia 01 de junho de 1974, houve um vazamento de aproximadamente 30 toneladas de ciclohexano que volatilizaram e formaram uma nuvem de vapor que foi incendiada, de maneira desconhecida, provocando uma explosão.

Alguns meses antes do acidente, em uma inspeção, foi observado um vazamento no quinto reator da instalação, o qual foi removido para reparos e, em seguida, foi realizado uma conexão entre o quarto e o sexto reator com objetivo de dar continuidade à produção. No entanto, como não havia em estoque tubos com o mesmo diâmetro dos utilizados na alimentação do reator (28 polegadas), foi utilizado um tubo flexível de 20 polegadas. A instalação inadequada do tubo de conexão foi responsável pelo vazamento de ciclohexano, uma vez que não suportou a pressão interna do reator (CROWL; LOUVAR, 2002).

Segundo a Companhia Ambiental do Estado de São Paulo (2018d), em consequência da explosão, 28 pessoas morreram e 36 ficaram feridas, bem como 1.821 casas e 167 comércios localizados próximos ao incidente foram danificados. Além disso, o fogo queimou por mais de 10 dias, destruindo totalmente a planta industrial.

### **3.2.2 Bhopal, Índia**

De acordo com Crowl e Lovar (2002), a planta da Union Carbide localizada em Bhopal, Índia, era responsável pela produção de pesticida. No processo de produção, formava um intermediário perigoso, o isocianato de metila (MIC), que é reativo, tóxico, volátil e inflamável.

A concentração máxima permitida para exposição de MIC a trabalhadores em um período de 8 horas é de 0,02 ppm e a inalação de vapores dessa substância é permitida até uma concentração de 21 ppm levando à irritação nasal e na garganta. Nesse sentido, doses superiores são letais devido ao comprometimento do sistema respiratório (CROWL; LOUVAR, 2002).

Segundo a Companhia Ambiental do Estado de São Paulo (2018a), na madrugada do dia 03 de dezembro de 1984, um tanque de armazenamento de MIC foi contaminado,

provocando uma reação química que culminou na elevação da temperatura e, consequentemente, a emissão de 25 toneladas de vapores de isocianato de metila.

Os vapores de MIC foram transportados por meio de um sistema de alívio de pressão, em um processo de purificação e *flare* instalados com o objetivo de consumir o MIC no caso de uma liberação indesejável, no entanto, os sistemas não estavam operando naquela ocasião (CROWL; LOUVAR, 2002).

O número preciso de mortos e feridos no acidente de Bhopal ainda é incerto, uma vez que os efeitos da liberação acidental de MIC são sentidos até a atualidade. O governo indiano estimou que o número de mortos subiu para 4 mil pessoas no ano de 1994. Outros dados fornecidos são de 30 mil pessoas permanentemente ou totalmente deficientes, 20 mil casos de doenças temporárias e 50 mil pessoas com ferimentos leves (LEES, 1996).

De acordo com Lees (1996), o acidente em Bhopal é sem dúvida o pior desastre que já ocorreu na indústria química, sendo seus impactos sentidos em diferentes lugares do mundo, particularmente na Índia e nos EUA.

### **3.2.3 Graniteville, Carolina do Sul**

De acordo com Dunning e Oswalt (2007), a empresa Avondale Milles, localizada em Graniteville, Carolina do Sul, era responsável pela produção de tecidos, no qual o cloro era utilizado com a finalidade de branquear tecidos.

Em 06 de janeiro de 2005, um trem carregado com cloro foi erroneamente desviado da linha principal e encaminhado para outra linha que continha um trem estacionado, provocando uma colisão que acarretou no descarrilamento de 18 vagões e no derramamento de, aproximadamente, 60 toneladas de cloro. Com a colisão, 5,4 mil moradores foram evacuados, 544 pessoas foram encaminhadas a hospitais e 9 pessoas morreram (DUNNING; OSWALT, 2007).

### **3.2.4 Carmen del Paraná, Paraguai**

No dia 20 de março de 2018, em uma estação de tratamento de água localizada na cidade de Carmen del Paraná, Paraguai, houve vazamento de cloro em decorrência de um rompimento de tubulação, sendo necessária a evacuação de 800 pessoas da região, entre as quais 300 eram estudantes do colégio Nuestra Señora del Carmen (ABC Color, 2018).

A estação de tratamento, que é subsidiada pela Entidade Binacional de Yacyretá (EBY), comunicou o falecimento de um operário, após uma tentativa dele de conter o vazamento de cloro.

### **3.2.5 Maceió, Brasil**

No dia 21 de maio de 2011, em uma planta da Braskem, localizada no bairro de Pontal da Barra, no estado brasileiro de Maceió, ocorreu um vazamento de gás cloro, o qual é empregado no processo de produção de PVC e defensivos agrícolas (EXAME, 2011).

O vazamento é resultante de alguns fatores associados ao processo de produção, tais como aumento da concentração de tricloroamina (TCA), subproduto do processo, condições de temperatura e modo de operação (UOL, 2011).

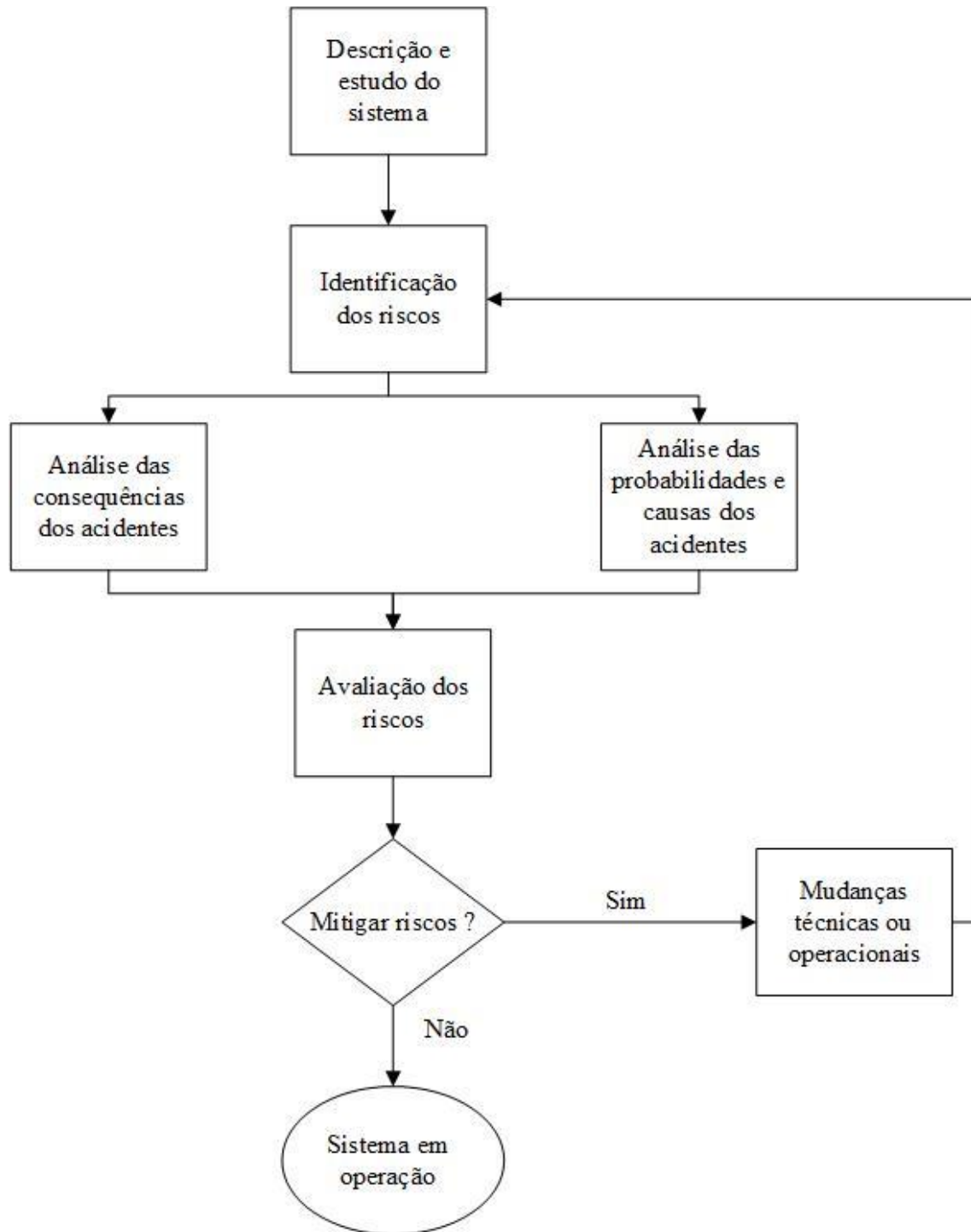
Em decorrência do vazamento, 31 pessoas foram hospitalizadas, sendo cinco em estado grave (EXAME, 2011).

## **3.3 METODOLOGIAS DE IDENTIFICAÇÃO DE RISCOS**

A identificação de perigos e a avaliação de riscos são, algumas vezes, combinadas em uma categoria geral chamada análise de risco, na qual procedimentos com a função de determinar as probabilidades são frequentemente chamados de análise preliminar de risco (APR), enquanto que os procedimentos que determinam as probabilidades e consequências são chamados de análise quantitativa de risco (AQR) (CROWL; LOUVAR, 2002).

Existem muitas metodologias para análise de riscos, dentre elas se destaca a apresentada na Figura 1.

Figura 1 – Procedimento para construção de análise de riscos



Fonte: Autora “adaptado de” Souza, 1995, p. 22

Muitos métodos estão disponíveis para a identificação de perigos e avaliação de riscos, no entanto, não existe uma única abordagem considerada a mais adequada para uma situação específica, sendo necessário experiência para a seleção do melhor método.

A identificação de perigos em uma planta química é feita ao adotar alguma das metodologias citadas a seguir: *Checklist*, *What if*, Análise Preliminar de Perigos (APP) e Análise de Perigos e Operabilidade (HAZOP). Sendo a última mais utilizada industrialmente.

### 3.3.1 Checklist

O *checklist* ou lista de verificação é utilizado para identificar os riscos associados a um processo e para assegurar que as atividades desenvolvidas sigam os procedimentos operacionais padronizados. Além disso, deve ser aplicada somente durante os estágios preliminares da identificação de perigos e não deve ser usada como um substituto para um procedimento mais completo de identificação de perigos (CROWL; LOUVAR, 2002).

Segundo Crowl et al. (2008), esta técnica é um meio simples para aplicação de conhecimentos a projetos ou situações para garantir que os recursos que aparecem na lista não sejam negligenciados.

De acordo com Souza (1995), por meio dos *Checklists* é possível analisar aspectos do sistema utilizando uma lista de itens pré-estabelecidos, desenvolvida com base em processos similares, na tentativa de descobrir e documentar possíveis deficiências do sistema.

Segundo Crowl e Louvar (2002), seu uso é mais eficaz na identificação de riscos decorrentes do projeto do processo, do *layout* da planta, do armazenamento de produtos químicos e dos sistemas elétricos.

A lista de verificação é organizada em uma tabela com três colunas: a primeira referente às áreas que foram completamente investigadas, a segunda coluna diz respeito aos itens que não se aplicam ao processo específico e, por fim, a terceira e última coluna é usada para marcar as áreas que requerem maior atenção. Um exemplo de *Checklist* é demonstrado na Figura 2.

Figura 2 – Método de identificação de perigo *Checklist*

Equipamento de segurança	Completo	Não se aplica	Requer mais estudo
1. Extintores de incêndio são necessários?	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
2. Equipamento respiratório especial é necessário?	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
3. Aparelho de detecção de vapor inflamável é necessário?	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
4. Materiais de extintores de incêndio são compatíveis com materiais de pro	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
5. Procedimentos especiais de emergência e alarmes são necessários?	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>

Fonte: Autora “adaptado de” Crowl e Louvar, 2002, p. 436

### 3.3.2 What if

Segundo Zoller e Esping (1993), o método *What if* consiste em uma avaliação sistemática de processo ou operação baseada em perguntas que iniciam com “e se?”, como um meio de identificar perigos. Nesse método, juntamente com a técnica *checklist* é, possivelmente, o mais antigo método de identificação de perigos e sendo também o mais popular.

Para aplicar esta técnica em uma planta química é necessário conhecer o fluxograma de processos, a planta de localização, as matérias-primas, intermediários, resíduos, produtos, instrumentação e a operação em si.

De acordo com Senne Junior (2003), a etapa inicial do processo é a formação de um grupo de profissionais para a revisão de riscos, a qual deve envolver o supervisor de operação, engenheiro de projeto, engenheiro do grupo técnico de processo, operador experiente e engenheiro de segurança.

O método é realizado a partir de uma planilha na qual são inseridos os acontecimentos sugeridos, as respostas desses acontecimentos, assim como as consequências dos mesmos e, por fim, as recomendações para que esse acontecimento não ocorra. A Tabela 1 exemplifica a planilha da técnica *What if*.

Tabela 1 – Método de identificação de perigo *What if*

E se?	Consequência/ Perigo	Recomendação	Responsável	Prazo para conclusão

Fonte: Autora “adaptado de” Companhia Ambiental do Estado de São Paulo, 2011, p. 115

Em Crawl et al. (2008), os métodos de hipóteses, tal como *What if*, são frequentemente usados em conjunto com a metodologia *Checklist*.

### 3.3.3 Análise Preliminar de Perigos (APP)

Segundo a Companhia Ambiental do Estado de São Paulo (2011), a Análise Preliminar de Perigos (APP), do inglês *Preliminary Hazard Analysis* (PHA) é uma técnica de origem militar, comumente empregada pelo Departamento de Defesa dos Estados Unidos da América com a finalidade de identificar os perigos de uma instalação com potencial de causar danos indesejáveis.



Através da APP é realizada uma análise superficial ainda durante a fase de projeto do processo, com o objetivo de efetuar as alterações necessárias conforme forem sendo identificados os riscos, de maneira que a execução seja mais rápida, fácil e com menor custo (SOUZA, 1995).

Esta técnica deve abordar todos os eventos perigosos da instalação estudada, citando quais apresentam risco iminente de falhas e, contemplando as falhas intrínsecas de equipamentos, instrumentos e de materiais, assim como erros humanos.

Em uma planilha de APP são identificados os perigos da instalação, suas causas e as consequências, a severidade do perigo e, por fim, as observações e recomendações pertinentes aos perigos identificados. Um exemplo de planilha para Análise Preliminar de Perigos é apresentado na Tabela 2 (COMPANHIA AMBIENTAL DO ESTADO DE SÃO PAULO, 2011).

Tabela 2 – Exemplo de uma planilha de APP

Perigo	Causa	Consequência	Categoria de Severidade	Observações e Recomendações

Fonte: Autora “adaptado de” CETESB, 2011, p. 112

A severidade do perigo é classificada por quatro níveis de acordo com os seus efeitos. Na Tabela 3, é possível notar as categorias de severidade dos perigos e os efeitos associados às mesmas.

Tabela 3 – Categorias de severidade

(continua)

Categoria de Severidade	Efeitos
I – Desprezível	Nenhum dano ou danos não mensuráveis
II – Marginal	Danos irrelevantes ao meio ambiente e à comunidade externa
III – Crítica	Possíveis danos ao meio ambiente devido a liberações de substâncias químicas tóxicas ou inflamáveis, alcançando áreas externas à instalação. Pode provocar lesões de gravidade moderada na população externa ou impactos ambientais com reduzido tempo de recuperação

Tabela 3 – Categorias de severidade

(conclusão)

Categoria de Severidade	Efeitos
IV – Catastróficas	Impactos ambientais devido a liberações de substâncias químicas tóxicas ou inflamáveis, atingindo áreas externas às instalações. Provoca mortes ou lesões graves na população externa ou impactos ao meio ambiente com tempo de recuperação elevado

Fonte: Autora “adaptado de” CETESB, 2011, p. 112

### 3.3.4 Estudo de perigos e operabilidade (HAZOP)

O Estudo de Perigos e Operabilidade, do inglês *Hazard and Operability Study* (HAZOP), é um procedimento de identificação e avaliação de perigos baseado na aplicação de palavras-guia com o objetivo de identificar possíveis desvios de uma operação que possam acarretar riscos para as pessoas, para o meio ambiente e para a planta em funcionamento. Este estudo considera que um perigo ou problema operacional pode surgir em um desvio do projeto ou operação de uma instalação (CROWL et al., 2008).

Segundo Crowl e Louvar (2002), para a realização do HAZOP são exigidas informações detalhadas a respeito do processo, como os diagramas de fluxo de processo, diagramas de processo e instrumentação, especificações de equipamentos, materiais de construção e balanços de massa e energia.

De acordo com Souza (1995), este procedimento é estruturado e sistemático, sendo necessária a definição de alguns termos específicos que são empregados no desenvolvimento da análise, como pode ser observado na Tabela 4.

Tabela 4 – Termos específicos utilizados no HAZOP e seus significados

(continua)

Termos	Significado
Nós de estudo	São pontos do processo que serão analisados caso haja desvios.
Intenção de operação	São os parâmetros de funcionamento normal da planta.
Desvios	São afastamentos das intenções da operação, ou seja, distúrbios provocados no equilíbrio do sistema

Tabela 4 – Termos específicos utilizados no HAZOP e seus significados

(conclusão)

Causas	São responsáveis pelos desvios na operação. As causas podem ser erros humanos, falhas do sistema e distúrbios externos
Consequências	São os resultados obtidos dos desvios da intenção de operação
Parâmetros do processo	São as variáveis físicas do processo e do procedimento operacional
Palavras – guias	Palavras utilizadas para qualificar os desvios da intenção de operação e utilizadas para guiar o grupo de profissionais

Fonte: Autora “adaptado de” SOUZA, 1995, p.32

A realização do HAZOP requer um grupo de profissionais com experiência em plantas, laboratórios e segurança, dentre os quais um participante que possua conhecimento e treinamento em HAZOP é intitulado líder e tem como função descrever os limites do estudo, garantir que a intenção do projeto seja claramente entendida, aplicar as palavras-guia e incentivar a equipe a discutir causas, consequências e possíveis ações corretivas para cada desvio. Há a possibilidade de outro integrante do grupo ser encarregado de registrar os resultados ou, ainda, há a alternativa da utilização de *softwares* que desempenham a mesma atividade (CROWL; LOUVAR, 2002).

A realização do HAZOP é constituída de 12 etapas:

- a) Utilizar como base o fluxograma detalhado do processo, realizar subdivisões no fluxograma de modo a obter várias unidades de processo e selecionar uma unidade para estudo;
- b) Escolher um nó de estudo (vaso, linha, instrução de operação);
- c) Descrever a função de projeto para o nó de estudo selecionado;
- d) Escolher um parâmetro de processo;
- e) Aplicar uma palavra guia ao parâmetro do processo para sugerir possíveis desvios;
- f) Determinar as possíveis causas decorrentes do desvio sugerido e anotar os sistemas de proteção;
- g) Avaliar as consequências do desvio;
- h) Recomendar ação;
- i) Registrar todas as informações;
- j) Repetir as etapas de 5 a 9 até que todas as palavras-guia aplicáveis tenham sido utilizadas ao parâmetro de processo escolhido;

- k) Repetir as etapas de 4 a 10 até que todos os parâmetros de processo aplicáveis tenham sido considerados para o nó de estudo fornecido;
- l) Repetir as etapas de 2 a 11 até que todos os nós do estudo tenham sido considerados para a seção determinada e prossiga para a próxima seção na folha de fluxo.

Segundo Crowl et al. (2008), as palavras-guia são usadas em conjunto com o projeto tendo o intuito de estimar possíveis desvios da operação. Algumas palavras-guia e seus significados podem ser observadas na Tabela 5.

Tabela 5 – Palavras-guias utilizada na metodologia HAZOP

Palavra-guia	Significado	Comentários
Não e nenhum	Negação completa das intenções de <i>design</i>	Nenhuma parte da intenção é alcançada e nada mais ocorre
Mais	Aumentos quantitativos	Quantidades e propriedades físicas relevantes, como taxas de fluxo, calor, pressão
Menos	Diminuições quantitativas	Quantidades e propriedades físicas relevantes, como taxas de fluxo, calor, pressão
Assim como	Aumentos quantitativos	Todas as intenções de projeto e operação são alcançadas, bem como alguma atividade adicional
Parte de	Diminuição qualitativa	Algumas partes da intenção são alcançadas enquanto outras não
Reverso	Oposto do pretendido	Atividades como fluxo reverso ou reação química ou veneno em vez de antídoto
Outro que	Substituição completa	Nenhuma parte da intenção é alcançada; algo bem diferente acontece

Fonte: Autora “adaptado de” CROWL et al, 2008, p. 43

O Estudo de Perigos e Operabilidade (HAZOP) pode ser aplicado em qualquer processo químico, seja ele contínuo ou em batelada. Em um processo contínuo, é necessário um conjunto de fluxogramas ou diagramas de tubulação e instrumentos, enquanto em um processo em batelada, no qual há a variação da concentração no tempo, é preciso levar em consideração essa variável, incorporando palavras-guia associadas ao tempo (CROWL et al., 2008).

É possível observar essas palavras-guias e os significados na Tabela 6.

Tabela 6 – Palavras-guia associadas à variável tempo

Palavra-guia	Significado
Sem tempo	Etapa perdida
Mais tempo	A etapa não ocorre quando deveria
Menos tempo	A etapa ocorre antes que a etapa anterior seja concluída
Momento errado	Fluxo ou outra atividade ocorre quando não deveria

Fonte: Autora “adaptado de” CROWL et al, 2008, p. 45

A partir das palavras-guia, o grupo determina as causas específicas de cada desvio e, então, suas consequências, sendo possível apontar qualitativamente a dimensão do perigo. Após definida a magnitude do perigo, são identificadas e avaliadas as salvaguardas existentes no projeto, recomendando proteções e ações adicionais, além de requerer um estudo específico e aprofundado e indicar uma avaliação mais extensa, quando necessário.

Atualmente foi desenvolvido o HAZOP humano com o intuito de mensurar as falhas de operários, o qual é utilizado em conjunto com o HAZOP clássico. Alguns autores, como Moura (2004), associam a matriz de risco à elaboração da planilha de HAZOP, o que torna o método quantitativo para análise de perigo.

Um exemplo de planilha utilizada para a realização da metodologia HAZOP é demonstrado na Tabela 7.

Tabela 7 – Planilha para a realização do Estudo de Perigo e Operabilidade (HAZOP)

Nome do projeto:				Data:		Página de		Concluído por:	
Processo:								Sem ação:	
Seção:				Desenho de referência:				Data de resposta:	
Item	Nó de estudo	Parâmetros do processo	Desvios (Palavras-guias)	Possíveis causas	Possíveis consequências	Ação requerida	Assinado por:		

Fonte: Autora “adaptado de” CROWL; LOUVAR, 2002, p. 451

### 3.4 METODOLOGIAS PARA QUANTIFICAÇÃO DE RISCOS

Após a identificação e determinação dos riscos é necessário quantificá-los e, para isso são utilizadas metodologias quantitativas, como a Análise Quantitativa de Riscos (AQR) e *Layer of Protection Analysis* (LOPA).

#### 3.4.1 Análise quantitativa de riscos (AQR)

De acordo com Ale e Uijt de Haag (2005), a análise quantitativa de riscos (AQR) é um método utilizado para identificar e quantificar o risco referente a atividades de engenharia e, dessa forma, fornece sugestões com o intuito de reduzir os riscos do sistema.

Para a realização de um estudo de análise quantitativa de riscos é necessário:

- a) Definir as sequências de eventos potenciais e potenciais incidentes;
- b) Avaliar as consequências do incidente;
- c) Estimar as possíveis frequências de incidentes;
- d) Estimar os impactos dos incidentes nas pessoas, ambiente e propriedade;
- e) Estimar o risco combinando os impactos e frequências, registrando o risco a partir de uma matriz de risco.

O risco de um processo ou instalação é determinado por meio da probabilidade de uma liberação e das consequências da exposição dela. Para estimar a frequência de liberação de uma determinada substância em um processo são utilizadas outras metodologias: Árvore de Eventos e Árvore de Falhas (CROWL; LOUVAR, 2002).

##### 3.4.1.1 Árvore de Eventos

De acordo com Crowl e Louvar (2002), a análise da Árvore de Eventos é uma técnica utilizada para ponderar a frequência em uma análise de risco, sendo empregada para fornecer cenários de possíveis modos de falha.

A abordagem da Árvore de Eventos inclui os efeitos da iniciação de um evento, seguida pelo impacto dos sistemas de segurança. As etapas típicas em uma análise de Árvore de Eventos são:

- a) Identificar um evento inicial;
- b) Identificar as funções de segurança projetadas para lidar com o evento inicial;
- c) Construir a Árvore de Eventos;

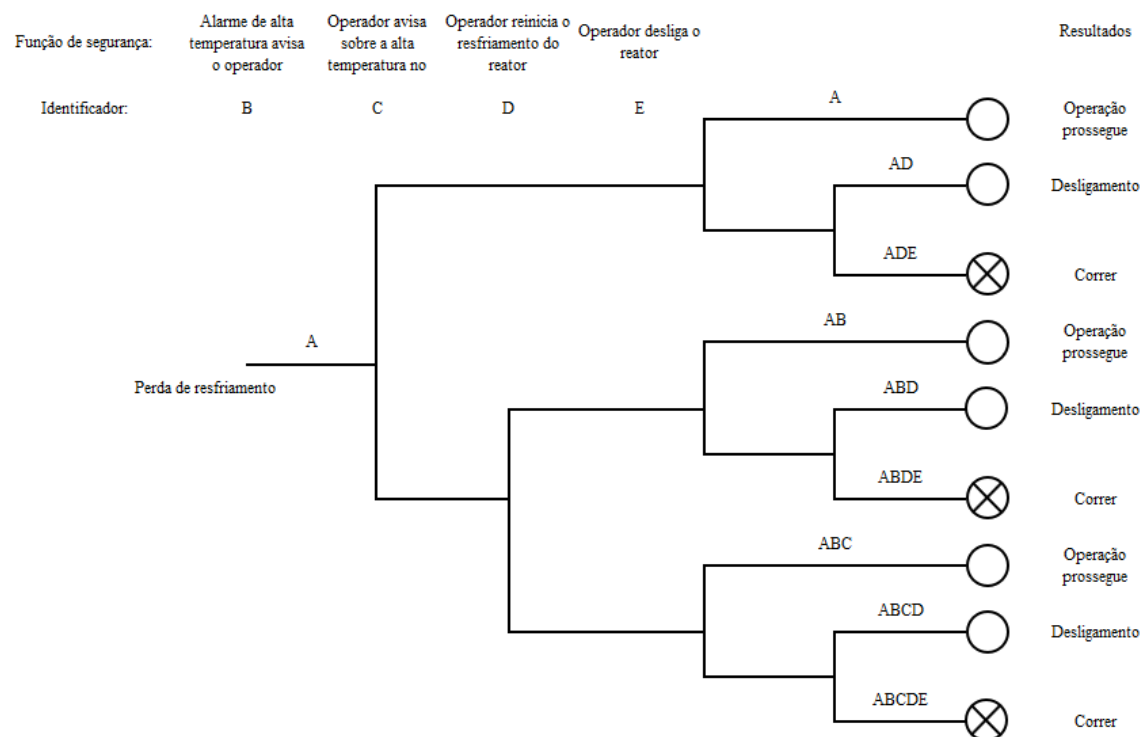


d) Descrever as sequências de eventos de acidentes resultantes.

Esse procedimento pode ser usado para atribuir valores numéricos aos vários eventos, em caso de disponibilidade dos dados apropriados, sendo empregado na determinação da probabilidade de uma certa sequência de eventos e decisão das melhorias necessárias (CROWL; LOUVAR, 2002).

Na Figura 3, é possível observar um exemplo de Árvore de Eventos para o cenário de superaquecimento de um reator:

Figura 3 – Árvore de eventos para o cenário de perda de resfriamento em um reator



Fonte: Autora “adaptado de” CROWL; LOUVAR, 2002, p. 488

A Árvore de Eventos é escrita da esquerda para a direita, sendo o evento inicial indicado primeiramente no centro da página. Uma linha é desenhada a partir do evento inicial, que na Figura 3 corresponde à perda de resfriamento do reator, em direção à primeira função de segurança, que pode ser bem-sucedida ou não.

Por convenção, quando uma operação apresenta êxito, ela é desenhada por uma linha reta para cima, enquanto uma falha é desenhada por uma linha para baixo. Linhas horizontais são ilustradas a partir desses dois estados para a próxima função de segurança (CROWL; LOUVAR, 2002).

A descrição da sequência e as consequências é indicada ao lado extremo direito da Árvore de Eventos. Os círculos abertos indicam as condições seguras, e os círculos com cruzes representam condições inseguras. A notação de letras na coluna de descrição da sequência é útil para identificar o evento em particular, sendo o evento inicial incluído como a primeira letra da notação.

Por fim, as probabilidades de cada evento são atribuídas e, quando multiplicadas pela frequência inicial, produzem frequências em cada ponto. As probabilidades para todos os membros em qualquer nível da Árvore de Eventos devem ser iguais a 1 (CROWL et al., 2008).

#### ***3.4.1.2 Árvore de Falhas***

As Árvores de Falhas tiveram origem na indústria aeroespacial, no entanto, sua grande utilização foi na indústria de energia nuclear para qualificar e quantificar os perigos e riscos associados à mesma. Mais recentemente, essa abordagem está se tornando mais popular nas indústrias de processos químicos, devido aos resultados obtidos pela indústria nuclear (CROWL; LOUVAR, 2002).

A Árvore de Falhas é um método dedutivo com o intuito de identificar maneiras pelas quais os perigos podem levar a acidentes. A abordagem começa com um acidente bem definido, identificado como evento de topo, e trabalha para trás em direção aos vários cenários que podem causar o acidente.

Segundo Crowl e Louvar (2002), antes que a Árvore de Falhas seja construída, é necessário cumprir algumas etapas:

- a) Definir o evento principal;
- b) Definir o evento existente;
- c) Definir os eventos não permitidos;
- d) Definir os limites físicos do processo;
- e) Definir a configuração do equipamento;
- f) Definir o nível de resolução.

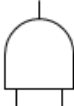

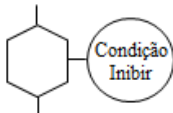


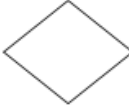
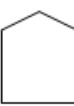
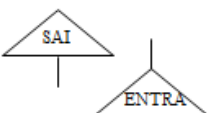
Para isso, é necessário desenhar o evento principal no topo da página, posteriormente deverão ser definidos os eventos (intermediários, básicos, não desenvolvidos ou externos) que contribuem para a ocorrência do evento principal. É necessário desenvolver a Árvore de Falhas até que todas as ramificações tenham sido finalizadas e, em seguida, decidir qual função lógica representa a interação desses eventos mais recentes.

Para os processos químicos razoavelmente complexos, várias funções lógicas adicionais devem ser consideradas: a função lógica "e" é importante para descrever processos que interagem em paralelo, ou seja, todos os eventos devem ocorrer para que o evento principal ocorra.

A função "inibir" é útil para eventos que levam a uma falha apenas em parte do tempo. Para eventos relacionados em série, no qual qualquer evento pode ocorrer para que o evento principal aconteça, eles devem ser conectados por uma função lógica "ou". Os círculos denotam eventos básicos e os retângulos denotam eventos intermediários (CROWL; LOUVAR, 2002).

Os componentes da função lógica usados em uma Árvore de Falhas são exibidos na Figura 4.

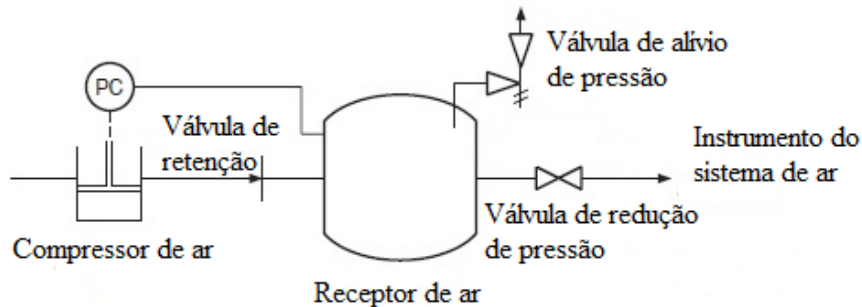
Figura 4 – Componentes de função lógica usados em uma Árvore de Falhas

	Portão E	O evento de saída resultante requer a ocorrência simultânea de todo o evento de entrada.
	Portão OU	O evento de saída resultante requer a ocorrência de qualquer evento de entrada individual.
	Evento INIBIR	O evento de saída ocorrerá se a entrada e o evento de inibição ocorrerem.
	Evento BÁSICO	Um evento de falha que não precisa de mais definição.
	Evento INTERMEDIÁRIO	Um evento que resulta da interação de vários outros eventos.
	Evento POUCO DESENVOLVIDO	Um evento que não pode ser desenvolvido devido à falta de informações adequadas.
	Evento EXTERNO	Um evento que é uma condição de contorno para a árvore de falhas.
	Símbolo TRANSFERIR	Usado para transferir a árvore de falhas para dentro e para fora de uma folha de papel.

Fonte: Autora “adaptado de” Crowl e Louvar, 2002, p. 493

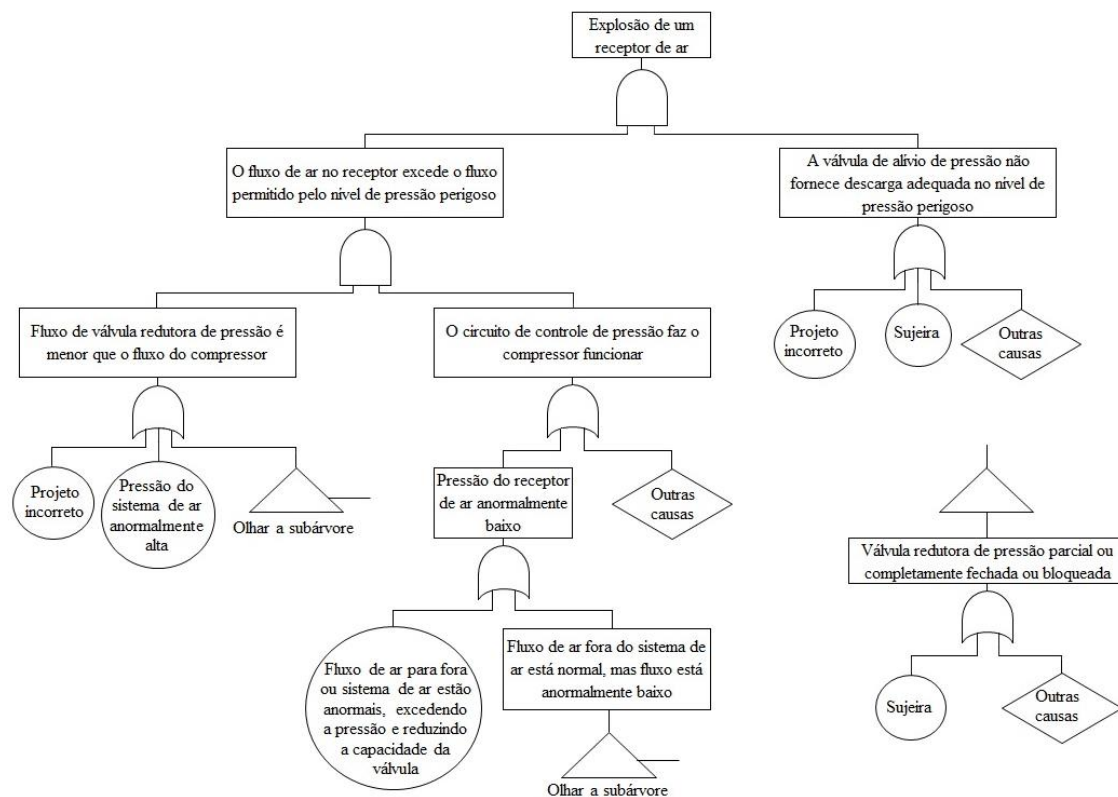
Na Figura 5, é possível observar um sistema de recebimento e distribuição de ar e, na Figura 6, a Árvore de Falhas para o cenário de explosão do receptor de ar.

Figura 5 – Sistema de recebimento e distribuição



Fonte: Autora “adaptado de” Crowl et al, 2008, p. 50

Figura 6 – Árvore de Falhas para explosão de um receptor de ar



Fonte: Autora “adaptado de” Crowl et al, 2008, p. 50

Segundo Crowl et al (2008), a estrutura lógica de uma Árvore de Falhas pode ser descrita em termos de equações algébricas booleanas, nos quais alguns pré-requisitos devem ser considerados para a aplicação desta metodologia:

- a) Os estados do equipamento são binários;
- b) A transição de um estado para outro é instantânea;
- c) Falhas nos componentes são estatisticamente independentes;
- d) A taxa de falha e a taxa de reparo são consistentes para cada item do equipamento;
- e) Após o reparo, o componente é retornado ao estado de trabalho.

De acordo com Crowl e Louvar (2002), após a construção da Árvore de Falhas é possível realizar cálculos quantitativos para determinar a probabilidade do evento principal utilizando dois métodos: diagrama de Árvore de Falhas e os Conjuntos de Cortes Mínimos.

Segundo Crowl et al (2008), a determinação da probabilidade do evento principal utilizando a Árvore de Falhas é possível a partir das probabilidades de falhas de todos os eventos básicos, que devem ser gravados no diagrama.

As probabilidades de falhas são obtidas em um banco de dados disponível para uso geral, no entanto, informações sobre a taxa de falha de equipamentos específicos geralmente são escassos e, portanto, técnicas de estimativa e dedução de dados devem ser aplicadas a bancos de dados genéricos para ajudar a compensar essa falha.

De acordo com Crowl et al. (2008), as probabilidades de erro humano também podem ser estimadas usando metodologias e técnicas originalmente desenvolvidas na indústria nuclear.

O outro procedimento para a determinação da probabilidade do evento principal corresponde ao método de Conjuntos de Cortes Mínimos, que diz respeito aos vários conjuntos de eventos que podem levar ao evento principal.

Dessa maneira, os Conjuntos de Cortes Mínimos básicos são ordenados com relação à probabilidade de falha, de maneira que aqueles que apresentem as maiores probabilidades devam ser examinados e implementados com sistemas de segurança, caso haja necessidade. Importante ressaltar que esta técnica obtém um resultado exato apenas quando as probabilidades de todos os eventos básicos forem pequenas, caso contrário, fornece um resultado superior à probabilidade real (CROWL; LOUVAR, 2002).

### ***3.4.1.3 Análise da Camada de Proteção (LOPA)***

Segundo Crowl et al. (2008), a *Layer of Protection Analysis* (LOPA) é uma metodologia semi-quantitativa para analisar e avaliar riscos, sendo, normalmente, aplicada após a conclusão de uma Análise Qualitativa de Riscos (AQR).

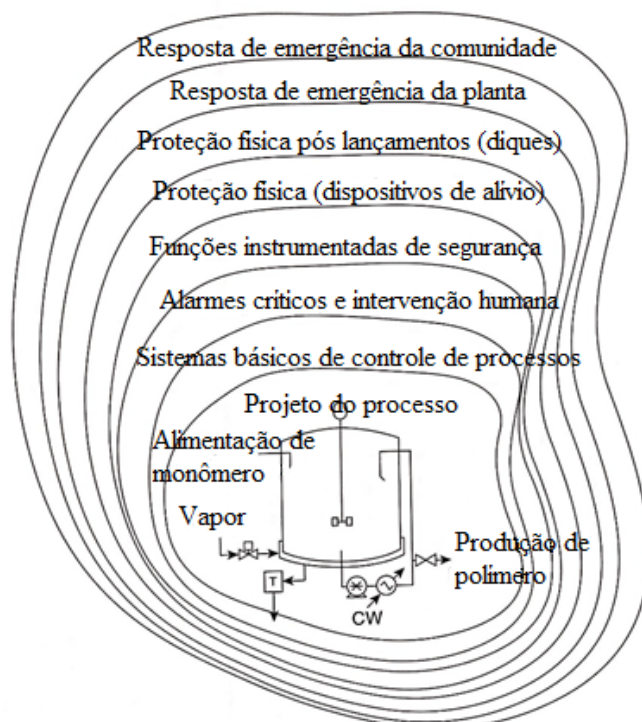
Para a caracterização do risco de um processo, são utilizados métodos simplificados, os quais utilizam como base a frequência de ocorrência e a consequência da severidade dos

cenários de riscos potenciais. O risco do processo é comparado com os critérios de risco do proprietário ou operador e, quando este valor supera os dos critérios de risco estabelecidos, é necessária a determinação de camadas de proteção, com o intuito de reduzir o risco do processo ao nível dos critérios de risco.

Neste sentido, os critérios de riscos variam conforme a operação, processo e empresa, sendo estabelecidos de acordo com o limite entre risco aceitável e inaceitável. Os critérios podem incluir a frequência de mortes e a frequência de incêndios, a frequência máxima de uma categoria específica de uma consequência e o número necessário de camadas independentes de proteção para uma categoria de consequência específica (CROWL; LOUVAR, 2002).

As camadas de proteção são salvaguardas projetadas e gerenciadas para atingir sete atributos principais: independência, funcionalidade, integridade, confiabilidade, capacidade de auditoria, segurança de acesso e gerenciamento de mudanças. Podendo incluir *design*, controle, supervisão, prevenção, mitigação, limitação, barreiras e sistemas de resposta a emergências mais seguros, dependendo da estratégia de gerenciamento de risco do proprietário ou operador. O conceito de *Layer of Protection Analysis* pode ser observado na Figura 7 (CROWL et al., 2008).

Figura 7 – *Layer of Protection Analysis* para reduzir a frequência de um acidente



Fonte: Autora “adaptado de” Crowl e Louvar, 2002, p. 501

A redução de risco em uma *Layer of Protection Analysis* (LOPA) é realizada através da implementação de camadas de proteção, cuja finalidade é reduzir a frequência e/ou consequência do cenário de risco, sendo que as consequências os efeitos e as camadas de proteção são definidas por aproximação com categorias, enquanto as frequências são estimadas. Os valores e categorias aproximados são selecionados para fornecer resultados conservadores.

De acordo com Crawl e Louvar (2002), o estudo da LOPA é fundamentado em 7 passos, que incluem:

- a) Identificar uma única consequência;
- b) Identificar um cenário de acidente e a causa associada à consequência;
- c) Identificar o evento inicial para o cenário e estimar a frequência do evento inicial;
- d) Identificar as camadas de proteção disponíveis para a consequência específica e estimar a probabilidade de falha sob demanda para cada camada de proteção;
- e) Combinar a frequência de evento inicial com as probabilidades de falha sob demanda das camadas de proteção independentes para estimar uma frequência de consequências mitigada para este evento inicial;
- f) Traçar o gráfico de consequência em função da frequência das consequências para estimar o risco;
- g) Avaliar o risco de aceitação.

Ao final, este procedimento é repetido para outras consequências e cenários.

### 3.5 MODELAGEM MATEMÁTICA PARA DISPERSÃO ATMOSFÉRICA

Em um acidente pode ocorrer a liberação de materiais tóxicos rapidamente e em quantidades que comprometam a saúde dos funcionários da planta e da população local. Os grandes acidentes industriais que ocorreram em vários lugares do mundo nos últimos tempos demonstraram a importância de um planejamento para emergência que vise minimizar a ocorrência e a consequência de uma liberação tóxica (CROWL; LOUVAR, 2002).

De acordo com Moura (2004), ao quantificar as consequências de um risco, os problemas ambientais podem ser classificados em três categorias:

- a) Problemas globais que comprometem toda humanidade ou cuja consequência é grande o suficiente para ser considerada como global, prejudicando as condições de vida na Terra;
- b) Problemas regionais que comprometem uma região geográfica definida;

- c) Problemas locais que comprometem a planta química e suas vizinhanças.

Os modelos de liberação tóxica são utilizados para estimar os efeitos de uma liberação em uma planta química e sua comunidade, buscando identificar possíveis problemas antes que estes ocorram. Essas análises são desenvolvidas em três etapas:

- a) Identificar o incidente de liberação;
- b) Desenvolver um modelo de fonte para descrever como os materiais são lançados e a taxa de liberação;
- c) Estimar a concentração do material liberado no meio ambiente para determinar os impactos e efeitos.

Após a análise com a aplicação de modelos de dispersão, algumas decisões são tomadas no sentido de eliminar ou reduzir a probabilidade de acidentes. Dentre elas, as principais opções são:

- a) Desenvolver um plano de resposta de emergência com a comunidade;
- b) Desenvolver modificações de engenharia para eliminar a fonte da liberação;
- c) Adicionar depuradores de ventilação apropriados ou outros equipamentos de remoção de vapor;
- d) Redução de inventários de materiais perigosos para reduzir a quantidade liberada;
- e) Adição de monitores de área para detectar vazamentos incipientes;
- f) Fornecer válvulas de bloco e controles de engenharia para eliminar níveis perigosos de derrames e vazamentos.

### **3.5.1 Modelos de dispersão neutro flutuante**

Os modelos de dispersão neutro flutuante são utilizados para determinar a concentração das substâncias tóxicas, sendo aplicado para gases com baixas concentrações. São comumente considerados dois tipos de liberação: contínua e instantânea.

Segundo Crowl e Louvar (2002), o modelo de liberação contínua, também denominada de pluma, descreve a concentração do material em estado estacionário de uma fonte ininterrupta, enquanto o modelo de liberação instantânea, denominado de *puff*, descreve a concentração temporal do material a partir de uma única liberação.

Existem alguns modelos que descrevem o comportamento de gases com fluatibilidade neutra, dentre os quais podem ser destacados o Modelo de Roberts, Modelo de Sutton e Modelo de Pasquill-Gifford.



### 3.5.1.1 Modelo de Roberts

Segundo Roberts (1923), o qual analisou a dispersão de fumaças para vários tipos de liberação, é possível obter o comportamento da concentração do gás em função da distância e do tempo.

No desenvolvimento do modelo, para dispersão de um gás a partir de uma fonte pontual instantânea sob ausência de vento, foram definidas as condições de contorno a seguir:

$$\begin{aligned}\bar{C} &\rightarrow 0 && \text{como } t \rightarrow 0 \\ \bar{C} &\rightarrow 0 && \text{como } t \rightarrow \infty\end{aligned}$$

Para este caso, em que a dispersão é anisotrópica, ou seja, as propriedades físicas dependem da direção em que são medidas, o comportamento do gás em função da distância e do tempo para uma liberação a partir de uma fonte pontual instantânea pode ser observado pela Equação (2) (LEES, 1996).

$$\bar{C}(x, y, z, t) = \frac{Q^*}{8(\pi t)^{3/2}(K_x K_y K_z)^{1/2}} \exp \left[ -\frac{1}{4t} \left( \frac{x^2}{K_x} + \frac{y^2}{K_y} + \frac{z^2}{K_z} \right) \right] \quad (2)$$

O comportamento da concentração do gás em função da distância para uma liberação a partir de uma fonte pontual contínua é apresentado na Equação (3).

$$\bar{C}(x, y, z) = \frac{Q}{4\pi x(K_x K_y)^{1/2}} \exp \left[ -\frac{u}{4x} \left( \frac{y^2}{K_y} + \frac{z^2}{K_z} \right) \right] \quad (3)$$

De acordo com Lees (1996), as equações apresentadas até então são aplicadas para fontes elevadas, em que a concentração não é afetada pelas características do solo. No entanto, se a fonte estiver na superfície, o solo representa uma camada limite impermeável cujo efeito corresponde em dobrar a concentração.

Dessa maneira, a Equação (2) passa a ser escrita da seguinte maneira:

$$\bar{C}(x, y, z, t) = \frac{Q^*}{4(\pi t)^{3/2}(K_x K_y K_z)^{1/2}} \exp \left[ -\frac{1}{4t} \left( \frac{x^2}{K_x} + \frac{y^2}{K_y} + \frac{z^2}{K_z} \right) \right] \quad (4)$$

A Equação (3), que corresponde à liberação a partir de uma fonte pontual contínua, passa a ser escrita da seguinte forma:

$$\bar{C}(x, y, z) = \frac{Q}{2\pi x(K_y K_z)^{1/2}} \exp \left[ -\frac{u}{4x} \left( \frac{y^2}{K_y} + \frac{z^2}{K_z} \right) \right] \quad (5)$$

Todas as equações apresentadas até aqui são utilizadas para liberações que ocorrem ao nível do solo, entretanto, pode ocorrer a liberação de um material indesejado através de uma fonte elevada, como uma chaminé ou um respiradouro alto. Neste caso, para determinar a concentração média da substância tóxica é utilizada a Equação (6).

$$\bar{C}(x, y, z) = \frac{Q}{4\pi K_x} \exp \left( -\frac{uy^2}{4K_x} \right) \cdot \left\{ \exp \left[ -\frac{u}{4K_x} (z-h)^2 \right] + \exp \left[ -\frac{u}{4K_x} (z+h)^2 \right] \right\} \quad (6)$$

A Equação (5) e a Equação (6) fornecem as concentrações em todas as direções a partir da fonte de liberação, porém, é conveniente estabelecer alguns limites para a nuvem tóxica. Por convenção, foram estabelecidos os limites da nuvem  $y_0$  e  $z_0$  como uma proporção fixa, correspondente a um décimo da concentração máxima obtida na direção  $x$ .

O limite da nuvem no eixo  $y$  é dado pela Equação (7).

$$y_0 = \left( \frac{4}{u} K_y x \ln 10 \right)^{1/2} \quad (7)$$

O limite da nuvem correspondente ao eixo  $z$  é dado pela Equação (8).

$$z_0 = \left( \frac{4}{u} K_z x \ln 10 \right)^{1/2} \quad (8)$$

Consequentemente,

$$y_0 \propto z_0 \propto x^{1/2} \quad (9)$$

Dessa maneira, a concentração média para uma liberação a partir de uma fonte pontual contínua ao nível do solo, ou seja, para  $y = z = 0$ , é dada pela Equação (10).

$$\bar{C}(x) = \frac{Q}{2\pi x(K_x K_y)^{1/2}} \quad (10)$$

Ao aplicar essas equações a experimentos, foi observado que o modelo é insatisfatório, de maneira que não é apropriado modelar a dispersão de gases na atmosfera utilizando o coeficiente de difusão de Fickian ( $K$ ). No entanto, as equações obtidas serviram de base para o desenvolvimento de trabalhos posteriores na área de dispersão de gases com flutuabilidade neutra (LEES, 1996).

### 3.5.1.2 Modelo de Sutton

De acordo com Sutton (1953), a falha na aplicabilidade do coeficiente de difusão de Fickian contribuiu para o desenvolvimento de modelos de dispersão mais realistas, sendo o primeiro modelo relevante desenvolvido por Sutton e observado na Equação (11).

$$\bar{C}(x, y, z, t) = \frac{2Q^*}{\pi^{3/2} C_x C_y C_z (ut)^{3/2(2-n)}} \exp \left[ -(ut)^{n-2} \left( \frac{x^2}{C_x^2} + \frac{y^2}{C_y^2} + \frac{z^2}{C_z^2} \right) \right] \quad (11)$$

A Equação (11) é baseada no modelo de Roberts e se torna idêntica à mesma quando:

$$n = 1 \quad (12)$$

$$C^2 = \frac{4K}{u} \quad (13)$$

Para analisar o comportamento da concentração média em função da distância para liberação acidental de um gás a partir de uma fonte pontual contínua ao nível do solo, é utilizada a Equação (14).

$$\bar{C}(x, y, z) = \frac{2Q}{\pi C_y C_z u x^{2-n}} \exp \left[ -x^{n-2} \left( \frac{y^2}{C_y^2} + \frac{z^2}{C_z^2} \right) \right] \quad (14)$$

Quando a liberação acontece a uma altura de referência do solo, é necessário realizar algumas alterações na equação, como pode ser observado na Equação (15).

$$\bar{C}(x, y, z) = \frac{Q}{\pi C_y C_z u t^{(2-n)}} \exp \left[ -x^{n-2} \left( \frac{y^2}{C_y^2} \right) \right] \cdot \left\{ \exp \left[ -x^{n-2} \frac{(z-h)^2}{C_z^2} \right] + \exp \left[ -x^{n-2} \frac{(z+h)^2}{C_z^2} \right] \right\} \quad (15)$$

O índice de difusão  $n$  e o parâmetro de difusão  $C$  são constantes meteorológicas. O índice de difusão  $n$  é uma função das condições de estabilidade e apresenta valor igual a zero para condições de turbulência e valor igual a 0,25 para condições médias. O parâmetro  $C$  é uma função da altura e das condições de estabilidade e seus valores podem ser observados na Tabela 8 (LEES, 1996).

Tabela 8 – Parâmetros meteorológicos para o Modelo de Sutton

Altura da fonte (m)	$C_y$ (m <sup>1/8</sup> )	$C_z$ (m <sup>1/8</sup> )
0	0,21	0,12
10	0,21	0,12
25	0,12	0,12
30	0,10	0,10
75	0,09	0,09
100	0,07	0,07

Fonte: Autora “adaptado de” Lees, p. 15/108

### 3.5.1.3 Modelo de Pasquill-Gifford

Segundo Lees (1996), uma forma alternativa das Equações de Sutton foi apresentada por Pasquill e neste modelo foi utilizado a difusividade de turbilhão ( $K_j$ ), que corresponde à função da posição, tempo, velocidade do vento e condições climáticas, apresentando uma abordagem teoricamente útil. No entanto, não apresentava bons resultados quando aplicada experimentalmente, devido à falta de correlação adequada.

Para superar essa dificuldade, Gifford obteve coeficientes de dispersão que passaram a ser utilizados nesse modelo, dessa maneira, nomeando de modelo de dispersão de Pasquill-Gifford.

Aqui, é utilizada uma relação fornecida por Sutton, observada na Equação (16).

$$\sigma_x^2 = \frac{C^2}{2}(ut)^{2-n} \quad (16)$$

com expressões semelhantes dadas para  $\sigma_y$  e  $\sigma_z$ .

Os coeficientes de dispersão  $\sigma_x$ ,  $\sigma_y$  e  $\sigma_z$  representam os desvios-padrão da concentração nas direções transversais e verticais ( $x$ ,  $y$ ,  $z$ ) e são facilmente obtidos experimentalmente, sendo função das condições atmosféricas e a da distância da liberação no sentido favorável ao vento (PASQUILL, 1961).

As condições atmosféricas são classificadas de acordo com seis classes de estabilidade atmosférica que são definidas com base na velocidade do vento e intensidade de luz solar, como podem ser observadas na Tabela 9.

Tabela 9 – Classes de estabilidade atmosférica usadas com o modelo de Pasquill-Gifford

Velocidade do vento na superfície (m/s)	Insolação diurna			Condições noturnas	
	Forte	Moderado	Leve	Nuvem fina ou nublado	Nebulosidade
< 2	A	A – B	B	F	F
2 – 3	A – B	B	C	E	F
3 – 4	B	B - C	C	D	E
4 – 6	C	C – D	D	D	D
>6	C	D	D	D	D

Fonte: Autora “adaptado de” Crowl e Louvar, 2002, p. 187

As classes de estabilidades são definidas como:

A: Extremamente instável;

B: Moderadamente instável;

C: Levemente instável;

D: Neutralmente estável;

E: Levemente estável;

F: Moderadamente estável.

Para liberação contínua (pluma) ou instantânea (*puff*), os coeficientes de dispersão são obtidos a partir das equações contidas na Tabela 10 e na Tabela 11:

Tabela 10 – Determinação dos coeficientes de dispersão para liberação contínua (pluma)

Classes de estabilidade	$\sigma_y$ (m)	$\sigma_z$ (m)
Condições rurais		
A	$0,22x(1 + 0,0001x)^{-1/2}$	$0,20x$
B	$0,16x(1 + 0,0001x)^{-1/2}$	$0,12x$
C	$0,11x(1 + 0,0001x)^{-1/2}$	$0,08x(1 + 0,0002x)^{-1/2}$
D	$0,08x(1 + 0,0001x)^{-1/2}$	$0,06x(1 + 0,0015x)^{-1/2}$
E	$0,06x(1 + 0,0001x)^{-1/2}$	$0,03x(1 + 0,0003x)^{-1}$
F	$0,04x(1 + 0,0001x)^{-1/2}$	$0,016x(1 + 0,0003x)^{-1}$
Condições urbanas		
A – B	$0,32x(1 + 0,0004x)^{-1/2}$	$0,24x(1 + 0,0001x)^{-1/2}$
C	$0,22x(1 + 0,0004x)^{-1/2}$	$0,20x$
D	$0,16x(1 + 0,0004x)^{-1/2}$	$0,14x(1 + 0,0003x)^{-1/2}$
E – F	$0,11x(1 + 0,0004x)^{-1/2}$	$0,08x(1 + 0,0015x)^{-1/2}$

Fonte: Autora “adaptado de” Crowl e Louvar, 2002, p. 188

Tabela 11 – Determinação dos coeficientes de dispersão para liberação instantânea (*puff*)

Classes de estabilidade	$\sigma_y$ (m) ou $\sigma_x$ (m)	$\sigma_z$ (m)
A	$0,18x^{0,92}$	$0,60 x^{0,75}$
B	$0,14 x^{0,92}$	$0,53 x^{0,73}$
C	$0,10 x^{0,92}$	$0,34 x^{0,71}$
D	$0,06 x^{0,92}$	$0,15 x^{0,70}$
E	$0,04 x^{0,92}$	$0,10 x^{0,65}$
F	$0,02 x^{0,89}$	$0,05 x^{0,61}$

Fonte: Autora “adaptado de” Crowl e Louvar, 2002, p. 189

Para determinar o comportamento da concentração média em função da distância e do tempo para uma liberação de gás a partir de uma fonte pontual instantânea ao nível do solo é utilizada a Equação (17).

$$\bar{C}(x, y, z, t) = \frac{Q_m^*}{\sqrt{2\pi}^{3/2} \sigma_x \sigma_y \sigma_z} \exp \left[ -\frac{1}{2} \left( \frac{x^2}{\sigma_x^2} + \frac{y^2}{\sigma_y^2} + \frac{z^2}{\sigma_z^2} \right) \right] \quad (17)$$

Para esse caso, as coordenadas são medidas a partir da origem e se movimentam com a nuvem de acordo com a velocidade do vento.

Quando as coordenadas são utilizadas no ponto de liberação, é necessário realizar uma alteração de variável, substituindo a coordenada existente  $x$  por um novo sistema de coordenadas,  $(x - ut)$ , como pode ser observado na Equação (18).

$$\bar{C}(x, y, z, t) = \frac{Q_m^*}{\sqrt{2}\pi^{3/2}\sigma_x\sigma_y\sigma_z} \exp\left[-\frac{1}{2}\left(\frac{(x - ut)^2}{\sigma_x^2} + \frac{y^2}{\sigma_y^2} + \frac{z^2}{\sigma_z^2}\right)\right] \quad (18)$$

Para determinar a concentração média ao nível do solo e no eixo  $x$ , onde  $z = y = 0$ , é utilizada a Equação (19).

$$\bar{C}(x, 0, 0, t) = \frac{Q_m^*}{\sqrt{2}\pi^{3/2}\sigma_x\sigma_y\sigma_z} \exp\left[-\frac{1}{2}\left(\frac{(x - ut)^2}{\sigma_x^2}\right)\right] \quad (19)$$

A concentração média no centro da nuvem é encontrada em coordenadas  $(ut, 0, 0, t)$ , como é apresentada na Equação (20).

$$\bar{C}(ut, 0, 0, t) = \frac{Q_m^*}{\sqrt{2}\pi^{3/2}\sigma_x\sigma_y\sigma_z} \quad (20)$$

Para o caso da liberação instantânea (*puff*) ao nível do solo, a concentração da borda da nuvem é representada por  $\bar{C}(x, 0, 0, t)$  e equivale a 10% da concentração no centro da nuvem, dada por  $\bar{C}(ut, 0, 0, t)$ . Dessa maneira, é utilizada a Equação (21) para determinar a concentração na borda da nuvem.

$$\frac{\bar{C}(x, 0, 0, t)}{\bar{C}(ut, 0, 0, t)} = 0,1 \quad (21)$$

A nuvem isocêntrica, ou isocentro, é definida como pontos de igual concentração ao redor do limite da nuvem tóxica e é estimada a partir da estipulação de um limite de toxicidade, velocidade de vento e tempo. A largura da nuvem é determinada a partir da Equação (22).

$$y = \sigma_y \sqrt{2 \ln \left( \frac{\bar{C}(x, 0, 0, t)}{\bar{C}(x, y, 0, t)} \right)} \quad (22)$$

Para determinar o comportamento da concentração média em relação à distância e tempo para uma liberação acidental de gás que acontece a uma altura de referência do solo a partir de uma fonte pontual instantânea (*puff*), é utilizada a Equação (23).

$$\begin{aligned} \bar{C}(x, y, z, t) = \frac{Q_m^*}{\sqrt{2}\pi^{3/2}\sigma_x\sigma_y\sigma_z} \exp \left[ -\frac{1}{2} \left( \frac{y}{\sigma_y} \right)^2 \right] \cdot \left\{ \exp \left[ -\frac{1}{2} \left( \frac{z-h}{\sigma_z} \right)^2 \right] \right. \\ \left. + \exp \left[ -\frac{1}{2} \left( \frac{z+h}{\sigma_z} \right)^2 \right] \right\} \end{aligned} \quad (23)$$

A concentração média ao nível do solo é determinada a partir da Equação (24).

$$\bar{C}(x, y, 0, t) = \frac{Q_m^*}{\sqrt{2}\pi^{3/2}\sigma_x\sigma_y\sigma_z} \exp \left[ -\frac{1}{2} \left( \frac{y}{\sigma_y} \right)^2 - \frac{1}{2} \left( \frac{h}{\sigma_z} \right)^2 \right] \quad (24)$$

Para determinar a concentração média no centro da nuvem é utilizada a Equação (25).

$$\bar{C}(x, 0, 0, t) = \frac{Q_m^*}{\sqrt{2}\pi^{3/2}\sigma_x\sigma_y\sigma_z} \exp \left[ -\frac{1}{2} \left( \frac{h}{\sigma_z} \right)^2 \right] \quad (25)$$

A determinação da concentração média de um gás liberado na atmosfera através de uma fonte pontual contínua ao nível do solo é dada pela Equação (26).

$$\bar{C}(x, y, z) = \frac{Q_m}{\pi\sigma_y\sigma_z u} \exp \left[ -\frac{1}{2} \left( \frac{y^2}{\sigma_y^2} + \frac{z^2}{\sigma_z^2} \right) \right] \quad (26)$$

A concentração média ao nível do solo, ou seja, para  $z = 0$ , é dada pela Equação (27).

$$\bar{C}(x, y, 0) = \frac{Q_m}{\pi\sigma_y\sigma_z u} \exp \left[ -\frac{1}{2} \left( \frac{y}{\sigma_y} \right)^2 \right] \quad (27)$$



Para determinar a concentração média no centro da pluma, onde  $y = z = 0$ , é utilizada a Equação (28).

$$\bar{C}(x, 0, 0) = \frac{Q_m}{\pi \sigma_y \sigma_z u} \quad (28)$$

Quando a liberação da substância tóxica acontece a uma altura de referência do solo, é necessário realizar algumas alterações na equação, como pode ser observado na Equação (29).

$$\bar{C}(x, y, z) = \frac{Q_m}{2\pi \sigma_y \sigma_z u} \exp\left(-\frac{1}{2} \frac{y^2}{\sigma_y^2}\right) \cdot \left\{ \exp\left[-\frac{(z-h)^2}{2\sigma_z^2}\right] + \exp\left[-\frac{(z+h)^2}{2\sigma_z^2}\right] \right\} \quad (29)$$

Para determinar a concentração média no centro da pluma, em que  $z = 0$ , é utilizada a Equação (30).

$$\bar{C}(x, y, 0) = \frac{Q_m}{\pi \sigma_y \sigma_z u} \exp\left[-\frac{1}{2} \left(\frac{y}{\sigma_y}\right)^2 - \frac{1}{2} \left(\frac{h}{\sigma_z}\right)^2\right] \quad (30)$$

A concentração média no centro da pluma, ou seja, para  $y = z = 0$ , dada pela Equação (31).

$$\bar{C}(x, 0, 0) = \frac{Q_m}{\pi \sigma_y \sigma_z u} \exp\left[-\frac{1}{2} \left(\frac{h}{\sigma_z}\right)^2\right] \quad (31)$$

O modelo de Pasquill-Gifford é baseado no método estatístico, no qual é utilizado os coeficientes de dispersão que foram estimados de acordo com a estabilidade atmosférica e o tipo de terreno, o que o torna mais fácil para se aplicar.

Devido à facilidade de implementação do modelo de Pasquill-Gifford, este é aplicado em uma primeira avaliação, no entanto, o modelo apresenta limitações, sendo as mais relevantes a falta da análise de temperatura e de umidade relativa na dispersão de gases na atmosfera. Além disso, o modelo é válido para distâncias de 0,1 – 10 km do ponto de liberação

Embora o modelo de Pasquill-Gifford não considere parâmetros importantes para a dispersão de gases, apresenta boa correlação de resultados e, por isso, foi utilizado como base para a análise de dispersão de gases na atmosfera neste trabalho.

### 3.5.2 Modelo de dispersão para gases densos

De acordo com Britter (1989), a densidade de uma nuvem tóxica não resulta somente das propriedades do material liberado, mas também dos métodos de armazenamento e de liberação. A seguir, são descritos alguns fatores que caracterizam se a substância é considerada densa:

- a) Material com peso molecular superior ao ar;
- b) Material com peso molecular baixo, mas armazenado à baixa temperatura;
- c) Material com peso molecular baixo e que ao ser liberado produz gotículas que elevam a densidade da nuvem formada;
- d) Material que sofre uma transformação química decorrente da reação com vapor de água presente na atmosfera.

De acordo com Murray (1987), a dispersão de nuvens densa difere da dispersão neutra em relação ao fluxo descendente provocado pela gravidade, cisalhamento do vento nas interfaces, descarga de turbulência e a inércia do material liberado.

Além disso, a formação de nuvens com densidade superior à densidade do ar geralmente envolve mudanças de fase e transferência de calor com a superfície subjacente.

Os modelos de dispersão para nuvens com comportamento neutro flutuante apresentam boa correlação para gases com densidade superior a densidade do ar, no entanto, é necessário determinar o empuxo da nuvem para comprovar esse comportamento.

Quando os modelos de dispersão neutro flutuante não são adequados para analisar o comportamento de uma nuvem densa, é empregada outra metodologia baseada em modelos de dispersão de gases densos, que são divididos em três grupos: modelos fenomenológicos (empíricos), modelos intermediários (engenharia) e modelos computacionais de fluidos dinâmicos (pesquisa) (MARKIEWICZ, 2006).

#### 3.5.2.1 Modelos Empíricos

Nos modelos empíricos, a descrição da dispersão de nuvens densa é baseada em séries de monogramas ou correlações simples que foram construídos usando resultados de medições de muitos experimentos de campo e de laboratório. Neles, foram estudadas liberações de fontes instantâneas e contínuas ao nível do solo em terrenos planos e classe de estabilidade atmosférica neutra ou a condições levemente instáveis (MARKIEWICZ, 2006).

A influência da classe de estabilidade atmosférica, a rugosidade superficial e o tempo médio foram desconsiderados, uma vez que os dados disponíveis não mostraram a forte influência destes parâmetros na dispersão de gás denso.

A concentração do gás pesado é calculada a partir de diferentes relações para liberações instantâneas e contínuas em termos da constante de gravidade, diferença de densidade entre o gás e o ar ambiente, volume de liberação ou vazão de liberação, velocidade do vento ambiente. Um exemplo de modelo empírico foi proposto por Britter e McQuaid.

De acordo com Britter e McQuaid (1988), os quais realizaram uma análise dimensional e de correlação de dados sobre dispersão de nuvens densas, adequada para liberações instantâneas e contínuas ao nível do solo.

Para o desenvolvimento do modelo de dispersão, foi adotado como hipótese que a liberação da substância ocorre em temperatura ambiente sem a formação de gotículas, na ausência de aerodispersóides e que a estabilidade atmosférica não influencia nos resultados do modelo, além dos resultados serem aplicados apenas a terrenos planos.

O primeiro passo consiste em determinar se o modelo de gás denso é aplicável, definindo o empuxo da nuvem, como indicado na Equação (32).

$$g_0 = \frac{g(\rho_0 - \rho_a)}{\rho_a} \quad (32)$$

A dimensão de fonte ( $D_c$ ) para os tipos de lançamentos também pode ser definida, sendo a Equação (33) utilizada para lançamentos contínuos:

$$D_c = \left(\frac{q_0}{u}\right)^{1/2} \quad (33)$$

A dimensão da fonte ( $D_i$ ) para liberações instantâneas é definida pela Equação (34).

$$D_i = V_0^{1/3} \quad (34)$$

Os critérios de uma representação de nuvem densa são dados pelas equações a seguir, sendo a Equação (35) utilizada para lançamento contínuo:

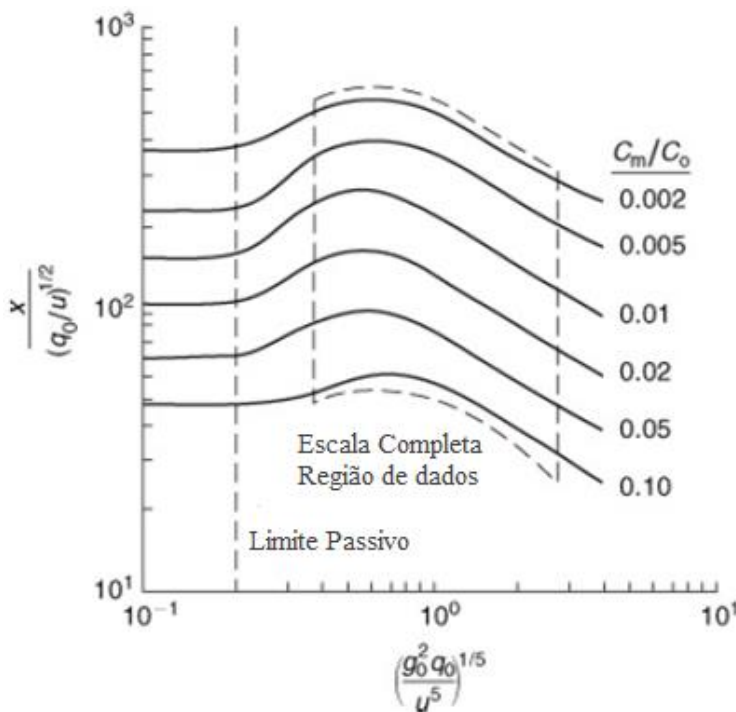
$$Cr_1 = \left( \frac{g_0 q_0}{u^3 D_c} \right)^{1/3} \geq 0.15 \quad (35)$$

A Equação (36) é utilizada para lançamento instantâneo:

$$Cr_1 = \frac{\sqrt{g_0 V_0}}{u D_i} \geq 0.20 \quad (36)$$

Se esses critérios da representação da nuvem densa forem satisfeitos, então as Figura 8 ou a Tabela 12 são usadas para estimar as concentrações para liberação contínua (pluma) em função da distância ( $x$ ).

Figura 8 – Correlação de Britter e McQuaid para liberação contínua (pluma) de gás denso



Fonte: Autora “adaptado de” Crowl e Louvar, 2002, p. 197

O eixo  $x$  do gráfico que expressa a correlação de Britter e McQuaid para liberação contínua é denominado de  $\alpha$  e pode ser calculado por meio da Equação (37).

$$\alpha = \log \left( \frac{g_0^2 q_0}{u^5} \right)^{1/5} \quad (37)$$

O eixo  $y$  do gráfico é denominado de  $\beta$  e pode ser estimado utilizando a Equação (38).

$$\beta = \log \left[ \frac{x}{(q_0/u)^{1/2}} \right] \quad (38)$$

As curvas demonstradas no gráfico representam a relação entre a concentração do limite de toxicidade adotado ( $C_m$ ) e a concentração no ponto da liberação ( $C_0$ ), que é determinada a partir da Equação (39).

$$C_0 = \frac{P.M}{R.T} \quad (39)$$

Tabela 12 – Equações das correlações Britter e McQuaid para liberação contínua (pluma)

(continua)

Taxa de concentração ( $C_m/C_0$ )	Faixa válida para $\alpha$	$\beta$
0,1	$\alpha \leq -0,55$	1,75
	$-0,55 < \alpha \leq -0,14$	$0,24\alpha + 1,88$
	$-0,14 < \alpha \leq 1$	$0,50\alpha + 1,78$
0,05	$\alpha \leq -0,68$	1,92
	$-0,68 < \alpha \leq -0,29$	$0,36\alpha + 2,16$
	$-0,29 < \alpha \leq -0,18$	2,06
	$-0,18 < \alpha \leq 1$	$-0,56\alpha + 1,96$
0,02	$\alpha \leq -0,69$	2,08
	$-0,69 < \alpha \leq -0,31$	$0,45\alpha + 2,39$
	$-0,31 < \alpha \leq -0,16$	2,25
	$-0,16 < \alpha \leq 1$	$-0,54\alpha + 2,16$
0,01	$\alpha \leq -0,70$	2,25
	$-0,70 < \alpha \leq -0,29$	$0,49\alpha + 2,59$
	$-0,29 < \alpha \leq -0,20$	2,45
	$-0,20 < \alpha \leq 1$	$-0,52\alpha + 2,35$

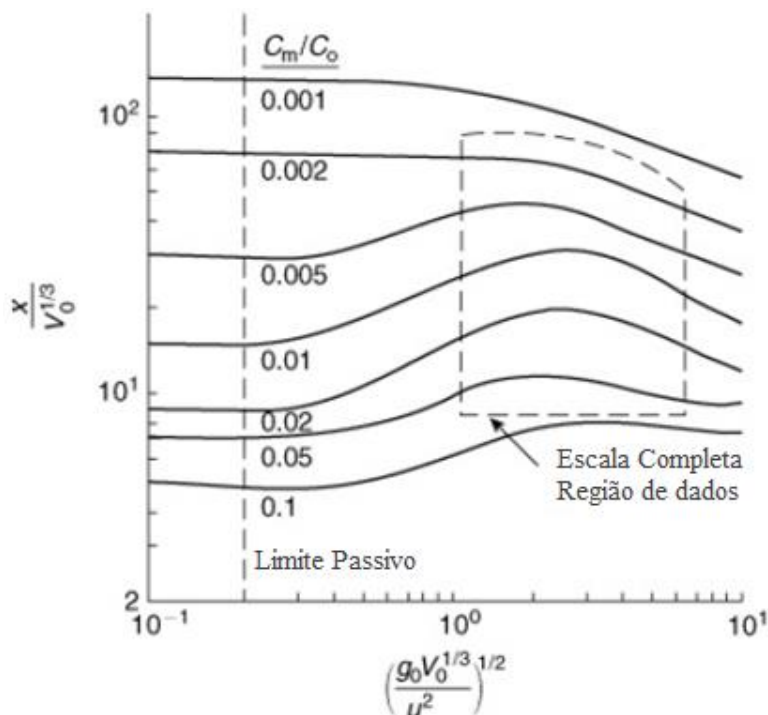
Tabela 12 – Equações das correlações Britter e McQuaid para liberação contínua (pluma)

(conclusão)

Taxa de concentração ( $C_m/C_o$ )	Faixa válida para $\alpha$	$\beta$
0,05	$\alpha \leq -0,67$	2,40
	$-0,67 < \alpha \leq -0,28$	$0,59\alpha + 2,80$
	$-0,28 < \alpha \leq -0,15$	2,63
	$-0,15 < \alpha \leq 1$	$-0,49\alpha + 2,56$
0,002	$\alpha \leq -0,69$	2,6
	$-0,69 < \alpha \leq -0,25$	$0,39\alpha + 2,87$
	$-0,25 < \alpha \leq -0,13$	2,77
	$-0,13 < \alpha \leq 1$	$-0,50\alpha + 2,71$

Fonte: Autora “adaptado de” Crowl e Louvar, 2002, p. 198

Para estimar a concentração de uma liberação instantânea (*puff*), são utilizadas a Figura 9 ou a Tabela 13:

Figura 9 – Correlação de Britter e McQuaid para liberação instantânea (*puff*) de gás denso

Fonte: Adaptado de Crowl e Louvar, 2002, p. 197

Para liberação instantânea, o eixo  $x$  do gráfico, que expressa a correlação de Britter e McQuaid, o qual é denominado de  $\alpha$ , pode ser determinado através da Equação (40).

$$\alpha = \log \left( \frac{g_0 V_0^{1/3}}{u^2} \right)^{1/2} \quad (40)$$

O eixo  $y$  do gráfico é denominado de  $\beta$  e pode ser estimado utilizando a Equação (41).

$$\beta = \log \left( \frac{x}{V_0^{1/3}} \right) \quad (41)$$

Tabela 13 – Equações das correlações Britter e McQuaid para liberação instantânea (*puff*)

(continua)

Taxa de concentração ( $C_m/C_o$ )	Faixa válida para $\alpha$	$\beta$
0,1	$\alpha \leq -0,44$	0,70
	$-0,44 < \alpha \leq 0,43$	$0,26\alpha + 0,81$
	$0,43 < \alpha \leq 1$	0,93
0,05	$\alpha \leq -0,56$	0,85
	$-0,56 < \alpha \leq 0,31$	$0,26\alpha + 1,0$
	$0,31 < \alpha \leq 1$	$-0,12\alpha + 1,12$
0,02	$\alpha \leq -0,66$	0,95
	$-0,66 < \alpha \leq 0,32$	$0,36\alpha + 1,19$
	$0,32 < \alpha \leq 1$	$-0,26\alpha + 1,38$
0,01	$\alpha \leq -0,71$	1,15
	$-0,71 < \alpha \leq 0,37$	$0,34\alpha + 1,39$
	$0,37 < \alpha \leq 1,0$	$-0,38\alpha + 1,66$
0,005	$\alpha \leq -0,52$	1,48
	$-0,52 < \alpha \leq 0,24$	$0,26\alpha + 1,62$
	$0,24 < \alpha \leq 1,0$	$0,30\alpha + 1,75$

Tabela 13 – Equações das correlações Britter e McQuaid para liberação instantânea (*puff*)

(conclusão)

Taxa de concentração ( $C_m/C_o$ )	Faixa válida para $\alpha$	$\beta$
0,002	$\alpha \leq 0,27$	1,83
	$0,27 < \alpha \leq 1$	$-0,32\alpha + 1,92$
0,001	$\alpha \leq -0,10$	2,075
	$-0,10 < \alpha \leq 1$	$-0,27\alpha + 2,05$

Fonte: Autora “adaptado de” Crowl e Louvar, 2002, p. 199

Para classificar o tipo de liberação, contínua ou instantânea, é determinado um segundo critério, no qual é possível estimar até que ponto o modelo de nuvem densa é adequado, é definido a partir da Equação (42).

$$Cr_2 = \frac{uR_d}{x} \quad (42)$$

Caso o critério definido pela Equação (42) apresente valor maior ou igual a 2.5, a liberação de gás denso é considerada contínua, no entanto, se o valor for menor ou igual a 0.6, é classificada como instantânea. Se o valor estiver entre 0.6 e 2.5, as concentrações são calculadas usando modelos contínuos e instantâneos, e o resultado da concentração máxima é selecionado. Na Tabela 14, é possível observar como a liberação da substância tóxica é classificada.

Tabela 14 – Determinação do tipo de liberação de gás denso

Critério	Tipo de liberação
$\frac{uR_d}{x} \leq 0.6$	Instantânea
$0.6 \leq \frac{uR_d}{x} \leq 2.5$	Contínua e Instantânea
$\frac{uR_d}{x} \geq 2.5$	Contínua

Fonte: Autora “adaptado de” Crowl e Louvar, 2002, p. 198

Para liberação não isotérmica, o modelo de Britter e McQuaid recomenda dois cálculos:



- a) Aplicar um termo de correção para a concentração inicial que pode ser observado pela Equação (43);

$$C'_m = \frac{C_m}{C_m + (1 - C_m) \cdot (T_a/T_0)} \quad (43)$$

- b) Realizar o cálculo de transferência de calor, para que o material esteja na temperatura ambiente.

Se a diferença entre os dois cálculos for pequena, os efeitos não isotérmicos são assumidos como insignificantes, entretanto, caso os resultados dos cálculos estiverem dentro de um fator de 2, é considerado o resultado de máxima concentração ou o mais pessimista. Se a diferença for muito grande, superior a um fator de 2, então a concentração máxima, ou a mais pessimista, é selecionada, mas uma investigação mais aprofundada usando métodos mais detalhados é necessária.

O modelo de Britter e McQuaid é uma técnica de análise dimensional, fundamentada em uma correlação desenvolvida a partir de dados experimentais, baseada apenas em dados do terreno rural plano e, sendo aplicável apenas a esses tipos de lançamentos. Este modelo não leva em consideração parâmetros como a altura de liberação, a rugosidade do solo e os perfis de velocidade do vento (CROWL; LOUVAR, 2002).

De acordo com Markiewicz (2012), os *softwares* de análise de riscos TSCREEN e STOER utilizam como base as equações do modelo empírico.

O modelo de Britter e McQuaid tem como base o método empírico, o qual foi desenvolvido com base em uma análise dimensional e a correlação de dados existentes sobre dispersão de nuvem densa. Foi construído usando resultados de medições de experimentos de campo e de laboratório, o que torna sua aplicação mais fácil.

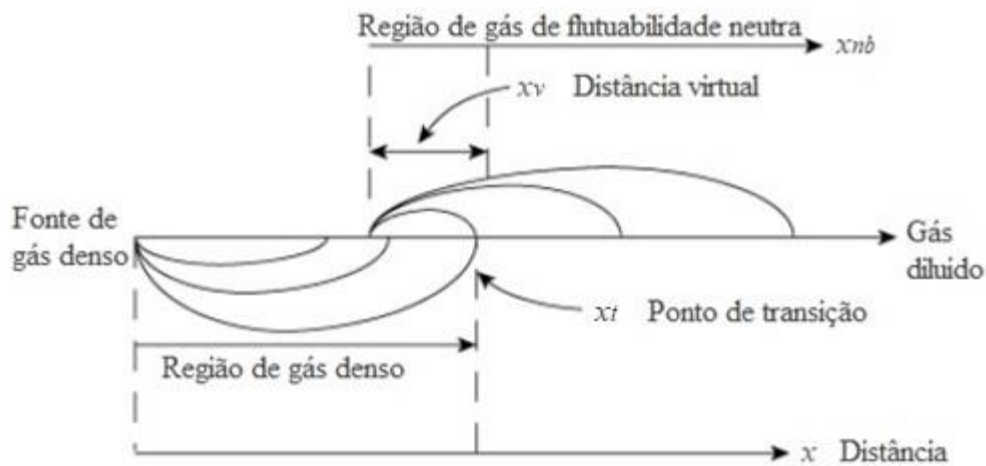
É adequado para liberação contínua e instantânea ao nível do solo, no entanto, o modelo apresenta limitações, sendo as mais relevantes a falta da análise da estabilidade atmosférica e a rugosidade superficial. Além disso, é aplicado apenas para terrenos planos.

Embora o modelo de Britter e McQuaid não considere parâmetros importantes para a dispersão de gases densos, apresenta boa correlação de resultados, sendo aplicado com confiança para diversos casos de liberação acidental de gás. Dessa maneira, será utilizado como base para a análise de dispersão de gases densos na atmosfera neste trabalho.

### 3.5.2.1.1 Transição da Dispersão de Gás Denso para Gás de Flutuabilidade Neutra

Segundo Crowl e Louvar (2011), quando um gás denso é liberado acidentalmente na atmosfera, é possível observar dois comportamentos distintos: primeiramente, o gás se movimenta de maneira descendente em direção ao solo até atingir o ponto de transição ( $x_t$ ), onde passa a se comportar como um gás de flutuabilidade neutra, como pode ser observado na Figura 10.

Figura 10 – Esquema da transição da dispersão de gás denso para gás de flutuabilidade neutra



Fonte: Autora “adaptado de” Crowl e Louvar, 2011, p. 219

Para localizar o ponto de transição ( $x_t$ ) de uma liberação contínua, a Equação (35) é modificada para incluir as propriedades locais, que são determinadas pela Equação (44) e Equação (45).

$$\rho_x = \rho_0 \left( \frac{C_x}{C_0} \right) + \rho_a \left( 1 - \frac{C_x}{C_0} \right), \quad (44)$$

$$g_x = g \left( \frac{\rho_x - \rho_a}{\rho_a} \right) = g \left( \frac{C_x}{C_0} \right) \cdot \left( \frac{\rho_0 - \rho_a}{\rho_a} \right) \quad (45)$$

A dispersão de gás denso é baseada no volume de gás liberado, o qual é diluído com o ar. Existe uma relação de balanço de material simples entre as concentrações e fluxos como pode ser observado na Equação (46).

$$q_x C_x = q_0 C_0 \quad (46)$$

Para determinar o ponto de transição, o critério mostrado na Equação (35) é convertido para as condições locais, conforme mostrado a Equação (47).

$$\left( \frac{g_x q_x}{u^3 D_{cx}} \right)^{1/3} \geq 0,15 \quad (47)$$

onde

$$D_{cx} = \left( \frac{q_x}{u} \right)^{1/2} \quad (48)$$

Depois de substituir  $g_x$ ,  $q_x$  e  $D_{cx}$  na Equação (47) o critério é convertido para:

$$\left( \frac{C_x}{C_0} \right)^{1/6} \cdot \left( \frac{g_0 q_0}{u^3 D_c} \right)^{1/3} \geq 0,15 \quad (49)$$

A razão de concentração  $C_x/C_0$  na transição (gás denso a flutuante neutro) é determinada pela conversão da desigualdade apresentada na Equação (49) em um sinal de igualdade. O ponto de transição ( $x_t$ ) é, então, determinado usando a Figura 8.

Como mostrado na Figura 10, a concentração do gás é estimada utilizando o modelo de Pasquill-Gifford a partir da distância virtual ( $x_v$ ), em que a concentração de flutuabilidade neutra é igual à concentração de gás denso.

A distância virtual ( $x_v$ ) é determinada usando a Equação (50), na qual a concentração na transição é denominada de  $C_x$ . Nesta equação, a única incógnita é a distância virtual ( $x_v$ ) e, a partir dela, é possível determinar os coeficientes de dispersão,  $\sigma_y$  e  $\sigma_z$ .

$$\sigma_y \sigma_z = \frac{q_0}{C_x \pi u} \quad (50)$$

A composição em qualquer distância a partir da fonte é calculada usando o modelo de Pasquill-Gifford, no entanto, os coeficientes de dispersão são determinados utilizando  $x_{nb}$ . Na Equação (51), é possível observar a relação entre as várias distâncias.

$$x_{nb} = x - x_t + x_v \quad (51)$$

O critério de gás denso para um modelo de liberação instantânea (*puff*) é determinado usando a Equação (44) e a Equação (45), além do balanço material que é determinado pela Equação (52).

$$V_x C_x = V_0 C_0 \quad (52)$$

O critério para qualquer local é determinado conforme a Equação (53).

$$\frac{\sqrt{g_x V_x}}{u D_{ix}} \geq 0,20 \quad (53)$$

onde

$$D_{ix} = (V_x)^{1/3} \quad (54)$$

Após a substituição das variáveis  $g_x$ ,  $q_x$  e  $D_{xi}$  na Equação (53) o critério de gás denso é convertido na Equação (55).

$$\left(\frac{C_x}{C_0}\right)^{1/3} \cdot \left(\frac{\sqrt{g_0 V_0}}{u V_0^{1/3}}\right) \geq 0,20 \quad (55)$$

A razão de concentração  $C_x/C_0$  na transição (gás denso a flutuante neutro) é determinada pela conversão da desigualdade na Equação (55), em um sinal de igualdade. A transição  $x_t$  é, então, determinada com a Figura 9.

A distância virtual ( $x_v$ ) é calculada usando a Equação (56), na qual a concentração na transição denominada de  $C_x$ . Nesta equação, a única incógnita é a distância virtual ( $x_v$ ) e a partir dela é determinado os coeficientes de dispersão  $\sigma_x$ ,  $\sigma_y$  e  $\sigma_z$ .

$$\sigma_x \sigma_y \sigma_z = \frac{V_0}{C_x \sqrt{2\pi}^{3/2}} \quad (56)$$

A composição em qualquer distância a partir da fonte é calculada usando o modelo de Pasquill-Gifford, no entanto, os coeficientes de dispersão são determinados utilizando  $x_{nb}$ . Na Equação (51) é possível observar a relação entre as várias distâncias.

### 3.5.2.2 Modelos de engenharia

Os modelos de engenharia são usados em cálculos de rotina para avaliação de risco, planejamento de resposta de emergência, avaliações de impacto ambiental e planejamento eficiente do uso da terra, além de serem necessárias para investigar o processo de dispersão em mais detalhes (MARKIEWICZ, 2013).

De acordo com Markiewicz (2006), os modelos de engenharia podem ser divididos em cinco grupos: caixa para lançamentos instantâneos, plumas uniformes ou gaussianas, pluma generalizada, plumas integrais e camada rasa.

Destes, estes últimos são os modelos mais complexos, pois diferem de outros deste grupo na capacidade de tratar efeitos topográficos e na dimensionalidade.

#### 3.5.2.2.1 Modelos de caixa para lançamentos instantâneos

De acordo com Van Ulden (1974), o qual desenvolveu o primeiro modelo de caixa para lançamentos instantâneos na década de 1970 e que é utilizado para descrever *puffs* de gases pesados, de maneira que a nuvem tóxica formada apresente formato cilíndrico.

De acordo com Markiewicz (2012), os modelos de caixa permitem estudar a dispersão do gás a diferentes velocidades de vento, rugosidades da superfície e estabilidades atmosférica, as quais foram descritas usando as classes de estabilidade de Pasquill-Gifford.

Além do mais, os modelos de caixa são empregados em alguns *softwares* de análise de riscos, sendo os mais utilizados DENZ-EDF, HEGABOX e HGSYSTEM.

#### 3.5.2.2.2 Modelos de pluma uniforme ou gaussiana

Os modelos de plumas uniformes ou gaussianas são usados para liberações contínuas de gases pesados ao nível do solo e foram desenvolvidos de maneira similar aos modelos de caixa para versões instantâneas.

Segundo Markiewicz (2012), esses modelos demonstram as primeiras tentativas para simular a dispersão de gás denso utilizando os modelos de pluma gaussiana convencionais, os quais são aplicados para gases de fluabilidade neutra.

#### *3.5.2.2.3 Modelos de pluma generalizada*

Os modelos de pluma generalizada podem ser considerados como uma extensão do modelo de plumas uniformes ou gaussianas, no sentido de que a variação espacial de concentrações e outros parâmetros da pluma, no entanto, não precisam seguir o perfil gaussiano ou uniforme.

De acordo com Markiewicz (2006), são usados perfis de similaridade determinados empiricamente para descrever o modelo, o que permite modelar alguns processos físicos de maneira mais realista.

O *software* de análise de riscos HAGADAS, incluído no pacote de computador HGSYSTEM e DEGADIS, utiliza como modelo base o modelo de pluma generalizada.

#### *3.5.2.2.4 Modelos de jatos integrais*

Segundo Markiewicz (2006), os modelos de jatos integrais são usados para descrever liberações contínuas e elevadas de gases pesados, os quais são baseados na integração de equações de conservação de massa, energia e momento.

Dentre os *softwares* utilizados na análise de riscos que descrevem o comportamento de gases denso utilizando os modelos de jatos integrais, os mais empregados são HMP, AEROPLUME e HFPLUME, do pacote HGSYSTEM.

#### *3.5.2.2.5 Modelos de camada superficial*

De acordo com Gheorghe e Nicolet-Monnier (1995), que desenvolveram os modelos de camada superficial no início dos anos 1980, as técnicas são utilizadas para liberações ao nível do solo, baseadas em equações diferenciais parciais que descrevem os princípios de conservação de massa, momento e energia em uma profundidade de nuvem.

Em modelos bidimensionais, essas equações são calculadas sobre a profundidade da nuvem e para modelos unidimensionais, e as equações são calculadas sobre a seção transversal da nuvem.

O modelo de camada superficial permite uma descrição realista do comportamento de nuvens de gás pesados.

Segundo Markiewicz (2012), os *softwares* SLAB e DISPLAY 1 utilizam como base o modelo de camada superficial unidimensional, enquanto os *softwares* TWODEE e DISPLAY 2 se baseiam no modelo de camada superficial bidimensional.

### 3.5.2.3 Modelos de pesquisa

Os modelos de pesquisa são modelos tridimensionais, nos quais um conjunto de equações diferenciais parciais depende do tempo e das três coordenadas espaciais para descrever os princípios de conservação de massa, momento e energia. Esses modelos podem ser aplicados a qualquer cenário de emissões, terreno ou condições meteorológicas (MARKIEWICZ, 2006).

Nestes, a descrição da turbulência é geralmente baseada na teoria do fechamento  $K$  ou fechamento  $k - \varepsilon$ , em que  $k$  representa a energia cinética de turbulência e  $\varepsilon$  a taxa de dissipação de turbulência. Para simplificar as equações, foram introduzidas as aproximações hidrostáticas. Além disso, os métodos de solução de equações incluem os esquemas de diferenças finitas, métodos de elementos finitos ou métodos de volume finito.

De acordo com Markiewicz (2006), o conjunto das equações básicas de turbulência no modelo da teoria do fechamento  $K$  inclui a equação de continuidade de massa, observada por meio da Equação (57).

$$\nabla \cdot (\rho_c U_c) = \frac{\partial \rho_c}{\partial t} \quad (57)$$

A equação do movimento é descrita a seguir.

$$\frac{\partial(\rho_c U_c)}{\partial t} + \rho_c U_c \nabla U_c = -\nabla(p - p_a) + \nabla(\rho_c K^m \nabla U_c) + (\rho_c - \rho_a)G \quad (58)$$

A Equação (59) demonstra o transporte de massa do gás tóxico.

$$\frac{\partial(\rho_c C_v)}{\partial t} + U_c \nabla \rho_c C_v = \frac{1}{\rho_c} \nabla(\rho_c K^c \nabla \rho_c C_v) + \left( \frac{\partial(\rho_c C_v)}{\partial t} \right)_{ph} \quad (59)$$

A Equação (60) demonstra o transporte de massa do líquido.

$$\frac{\partial(\rho_c C_l)}{\partial t} + U_c \nabla \rho_c C_l = \frac{1}{\rho_c} \nabla(\rho_c K^c \nabla \rho_c C_l) + \left( \frac{\partial(\rho_c C_v)}{\partial t} \right)_{ph} \quad (60)$$

A conservação de energia pode ser calculada através da Equação (61).

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} + U_c \nabla \theta = \frac{1}{\rho_c c_p} \nabla(\rho_c c_p K^\theta \nabla \theta) + \frac{c_{pn} - c_{pa}}{c_p} (K^c \nabla \rho_c C_v) \nabla \theta - \frac{L_c}{c_p} \left( \frac{\partial(\rho_c C_v)}{\partial t} \right)_{ph} \quad (61)$$

A aproximação da equação de estado, que define a temperatura potencial, e as equações que determinam os coeficientes turbulentos ( $K$ ) são adicionadas para fechar o sistema de equações.

A equação de estado pode ser observada a seguir.

$$\rho_c = \frac{pM}{R^*T} = \frac{p}{R^*T \left( \frac{C_v}{M_g} + \frac{1 - C_v}{M_a} \right)} \quad (62)$$

Os coeficientes turbulentos verticais e horizontais são demonstrados nas Equações (63) e (64).

$$K_z = \frac{k[(u_*z)^2 + (w_*l)^2]^{0,5}}{\varphi(R_i)} \quad (63)$$

$$K_y = \frac{kc_5 u_* z}{\varphi(R_i)} \quad (64)$$

O valor do coeficiente turbulento  $K_x$  é proporcional ao valor de  $K_z$ .

A função empírica ( $\varphi$ ) depende do número de Richardson ( $R_{i_a}$ ), que é determinado através da Equação (65).



$$R_{ia} = \frac{g}{T_a} \cdot \frac{(\partial T_a / \partial z + 0,01 \cdot K/m)}{(\partial u_h / \partial z)^3} \quad (65)$$

$$R_i = \frac{u_*^2 R_{ia}}{u_*^2 + w_*^2} + 0,05 \frac{\rho_c - \rho_a}{\rho_c} \cdot \frac{gl}{u_*^2 + w_*^2} \quad (66)$$

$$\varphi(R_i) = 1 + 5R_i \quad \text{para } R_i \geq 0 \quad (67)$$

$$\varphi(R_i) = (1 - 16R_i)^{-1/4} \quad \text{para momento } R_i < 0 \quad (68)$$

$$\varphi(R_i) = (1 - 16R_i)^{-1/2} \quad \text{para energia } R_i < 0 \quad (69)$$

As equações do modelo são resolvidas numericamente com condições iniciais e de contorno apropriadas, sendo espacialmente discretizadas pelo método dos elementos finitos em conjunto com o método de resíduos ponderados de Galerkin. O esquema de integração de tempo é basicamente definido pelo método explícito de Euler, exceto para o cálculo de pressão, que deve ser feito implicitamente.

Segundo Markiewicz (2012) alguns *softwares* de análise de riscos utilizam como base o modelo de pesquisa, dentre os quais se destacam o FEM3, MARIAH e HEAVYGAS.

### 3.5.3 Condições de pior caso (*Worst Case*)

A condição de pior caso corresponde à maior concentração da substância tóxica liberada no meio ambiente. Neste contexto, a maior concentração determinada para uma liberação contínua (pluma) é encontrada no ponto de liberação e, caso a liberação ocorra acima do nível do solo, a maior concentração sobre o solo é encontrada em um ponto ao lado da liberação no sentido favorável ao vento (CROWL; LOUVAR, 2002).

Para uma liberação instantânea (*puff*), no entanto, a concentração máxima é sempre encontrada no centro da nuvem e, caso a liberação ocorra acima do nível do solo, o centro da nuvem se moverá paralelamente ao solo e a concentração máxima sobre ele ocorrerá diretamente abaixo do centro da nuvem. Para um *puff* com formato próximo ao circular que se movimenta a favor do vento, ocorre, inicialmente, o aumento da circunferência até atingir a dimensão máxima e, posteriormente, ocorre a diminuição do diâmetro.

Para a determinação da concentração em um pior caso, é necessário que as condições climáticas sejam conhecidas e, caso isso não ocorra, algumas hipóteses podem ser consideradas.

Segundo Crowl e Louvar (2002), no modelo de Pasquill-Gifford, que considera o coeficiente de dispersão ao invés do coeficiente de turbilhão, é possível observar que a maior concentração é obtida para baixos valores de velocidade de vento e de coeficiente de dispersão, ou seja, para a classe de estabilidade F, classificada como moderadamente estável, cuja velocidade do vento corresponde a valores iguais ou inferiores a 2 m/s.

### 3.5.4 Parâmetros que afetam a dispersão

Segundo Crowl e Louvar (2002), os modelos de dispersão descrevem o transporte aéreo de materiais tóxicos para longe do local do acidente, que podem ocorrer por meio de liberação contínua (pluma) ou instantânea (*puff*), sendo a concentração máxima do material tóxico obtida no ponto de liberação, diminuindo com a distância a favor do vento.

Há uma variedade de parâmetros que afeta a dispersão atmosférica de materiais tóxicos:

- a) Velocidade do vento;
- b) Estabilidade atmosférica;
- c) Condições do solo (edifícios, lagos, árvores);
- d) Altura da liberação em relação ao nível do solo;
- e) Impulso e flutuabilidade do material lançado.

À medida que a velocidade do vento aumenta, a pluma obtém um formato mais longo e mais estreito, sendo transportada pelo vento rapidamente, no entanto, sua diluição está relacionada à quantidade do ar. Assim, para uma maior quantidade de ar há uma diluição mais efetiva.

A estabilidade atmosférica está relacionada com a mistura vertical do ar, que ocorre devido à diferença de temperatura do mesmo. A estabilidade atmosférica é classificada de acordo com três classes de estabilidade: instável, neutro e estável. Em condições atmosféricas instáveis, a maior temperatura é obtida ao solo e diminui com a altitude, dessa maneira, o ar de menor densidade está posicionado abaixo do ar de maior densidade, provocando uma turbulência mecânica atmosférica.

Para condições atmosféricas neutras, o ar acima do solo aquece e aumenta a velocidade do vento, reduzindo o efeito de entrada de energia solar, não influenciando a turbulência mecânica atmosférica. Em condições atmosféricas estáveis, a temperatura aumenta conforme o

aumento da altitude, assim, o ar de maior densidade está localizado abaixo do ar de menor densidade e a influência da flutuabilidade suprime a turbulência mecânica.

Como as condições de solo afetam a mistura mecânica na superfície e o perfil do vento, as árvores e edifícios proporcionam o aumento da mistura mecânica, enquanto que lagos e áreas abertas provocam o efeito oposto.

A altura em que ocorre a liberação da substância tóxica afeta a concentração ao nível do solo, ou seja, à medida que a altura da liberação aumenta, há a redução da concentração no nível do solo, por causa da dispersão da nuvem tóxica e o tempo que ela leva até tocar o chão.

A flutuabilidade e a força de empuxo do material liberado alteram a altura efetiva da liberação, ou seja, um gás com densidade menor do que o ar apresenta comportamento positivamente flutuante, sendo direcionado para cima. Por outro lado, um gás com densidade maior que a do ar apresenta uma flutuabilidade negativa, o que o direciona para o solo. À medida que o gás é transportado na direção do vento, ocorre a diluição com o ar até ser considerado como flutuante neutro e, nesse ponto, a dispersão é dominada pela turbulência ambiental (CROWL; LOUVAR, 2002).

Nestes modelos de dispersão de gases na atmosfera, não são avaliados a energia entre a água e o solo e, também, a existência de poeira de ressuspensão, que poderá de juntar à nuvem tóxica.

### 3.5.5 Critérios de Efeito Tóxico

Os critérios de toxicidade representam concentrações das substâncias químicas, intensidade dos agentes físicos ou doses de radiação presentes no ambiente de trabalho ou em uma situação acidental, sob os quais os trabalhadores ou a população podem ficar expostos, sem sofrer efeitos adversos à saúde.

Diversas agências governamentais e associações privadas desenvolveram critérios e métodos para determinar a concentração tóxica segura, entre os quais se destacam:

- a) *Emergency Response Planning Guideline* (ERPGs), para contaminantes do ar;
- b) *Immediately Dangerous to Life and Health* (IDLH);
- c) *Emergency Exposure Guidance Levels* (EEGL) e *Short Term Public Exposure Guideline* (SPEGLs);
- d) *Threshold Limit Value* (TLVs), incluindo *Short-term Exposure Limits* (TLV-STELs) e *Ceiling Concentration* (TLV-Cs);
- e) *Toxic Dispersion Method* (TXDS);

f) Pontos finais tóxicos (*endpoints*).

Esses critérios e métodos são baseados em uma combinação de resultados de experiências com animais, observações de exposições humanas de longo e curto prazo, bem como avaliação de especialistas.

De acordo com Crowl e Louvar (2002), os ERPGs são preparados pela indústria, nos quais, três faixas de concentração são fornecidas como consequência da exposição a uma substância específica:

- a) O ERPG – 1 é a concentração máxima no ar na qual quase todos os indivíduos podem estar expostos por até 1 hora, desenvolvendo apenas efeitos adversos leves à saúde, como a percepção de um odor desprezível;
- b) O ERPG – 2 é a concentração máxima no ar abaixo da qual quase todos os indivíduos podem estar expostos por até 1 hora sem desenvolver efeitos ou sintomas de saúde irreversíveis que possam prejudicar suas habilidades para tomar medidas protetoras;
- c) O ERPG – 3 é a concentração máxima no ar na qual quase todos os indivíduos podem estar expostos por até 1 hora, desenvolvendo efeitos irreversíveis para a saúde e que possam ameaçar a vida.

Os ERPGs de algumas substâncias químicas podem ser observados na Tabela 15.

Tabela 15 – Valores de ERPGs para diversos compostos químicos, em ppm

Compostos químicos	ERPG – 1	ERPG – 2	ERPG – 3
Amônia	25	200	1000
Benzeno	50	150	1000
Cloro	1	3	20
Dimetilamina	1	100	500
Epicloridrina	2	20	100
Formaldeído	1	10	25
Metanol	200	1000	5000
Óxido de propileno	50	250	750
Tolueno	50	300	1000

Fonte: Autora “adaptado de” Crowl e Louvar, 2002, p. 201 e 202

Segundo Crowl e Louvar (2002), os valores de IDLH são utilizados como medidas de toxicidade aguda para gases industriais comuns, levando em consideração as reações tóxicas severas, que podem impedir a fuga do ambiente. Além disso, foram desenvolvidos para proteger

os trabalhadores saudáveis, sendo necessário ajustes para atender as populações sensíveis, como idosos e deficientes.

O método a respeito da toxicidade de produtos químicos EEGL é definido como uma concentração considerada aceitável para trabalhadores executarem suas tarefas durante condições de emergência por um intervalo de 1 a 24 horas. Outro método, o SPEGL, é direcionado à população, na qual a concentração empregada é reduzida para uma faixa de 10 a 50% dos valores do EEGL, além de ser determinada levando em consideração uma população heterogênea sensível.

Alguns limites de toxicidade baseados no EEGL para o intervalo de 1 a 24 horas podem ser observados na Tabela 16.

Tabela 16 – Valores de EEGLs para diversos compostos químicos, em ppm

Compostos químicos	EEGL (1 hora)	EEGL (24 horas)
Álcool Isopropílico	400	200
Amônia	100	—
Benzeno	50	2
Cloro	3	0,5
Dióxido de Enxofre	10	5
Etanolamina	50	3
Metanol	200	100
Tolueno	200	100
Xileno	200	100

Fonte: Autora “adaptado de” Crowl e Louvar, 2002, p. 204

Segundo Crowl e Louvar (2002), os métodos de toxicidade TLVs foram projetados visando proteger a saúde dos trabalhadores contra os efeitos resultantes da exposição a produtos químicos, que pode levar à irritação e à narcose.

O método TXDS é utilizado para analisar as consequências e estimar quantidades potencialmente catastróficas de substâncias tóxicas, sendo a *Acute Toxic Concentration* (ATC) definida como uma concentração capaz de provocar efeitos severos na saúde da população afetada, levando 5% das pessoas expostas à fatalidade após 1 hora de contato. A ATC é baseada no *Lowest Reported Lethal Concentration* (LCLO) para dados realizados em animais de testes, em um décimo do valor da *Median Lethal Concentration* (CL50), obtida em animais de testes e no valor do IDLH.

Os pontos finais tóxicos (*endpoints*) foram desenvolvidos para serem utilizados na modelagem da dispersão do ar para liberações de gases tóxicos, sendo utilizados o ERPG-2 ou o *Limiting Oxygen Concentration* (LOC), que é definido como a máxima concentração de uma substância perigosa no ar que não causará efeitos irreversíveis para a saúde da população em geral quando expostos a uma duração relativamente curta.

Na Tabela 17, é possível observar valores de pontos finais tóxicos para alguns compostos químicos.

Tabela 17 – Valores de ponto final tóxico para alguns compostos químicos

Compostos químicos	Ponto final tóxico (mg/L)
Álcool alílico	0,036
Amônia	0,14
Cloro	0,0087
Cloreto de metila	0,82
Dióxido de enxofre	0,0078
Epicloridrina	0,076
Óxido de etileno	0,090
Tolueno	0,0070

Fonte: Autora “adaptado de” Crowl e Louvar, 2002, p. 204

Em geral, os critérios toxicológicos utilizados para o desenvolvimento de planos de resposta de emergência são ERPGs, SPEGLs e EEGLs, que foram desenvolvidos buscando preservar a saúde da população ao redor da planta. Para incidentes que envolvam substâncias para as quais não há SPEGLs ou EEGL disponíveis, os níveis de IDLH fornecem critérios alternativos, sendo considerado o valor de um décimo do IDLH, uma vez que o mesmo não foi desenvolvido para priorizar as populações sensíveis, além de considerar um período máximo de exposição de 30 minutos.

O critério de toxicidade adotado no trabalho foi a *Emergency Exposure Guidance Levels* (ERPG), pois foi desenvolvida para proteger a saúde da população, além disso é a mais utilizada para planos de emergência.

Dentre as três classes de ERPG, foi selecionada a intermediária, ERPG-2, pois apresenta uma concentração na qual a população possa estar exposta sem desenvolver efeitos ou sintomas irreversíveis à saúde e que não comprometa a habilidade de tomar medidas protetivas. Além

disso, corresponde a uma concentração semelhante à concentração letal para 50% da população exposta (CL50).

A primeira classe, ERPG-1, apresenta uma concentração muito baixa, cujos efeitos são leves ou imperceptíveis, já a última classe, ERPG-3, considera uma concentração muito elevada, a qual pode causar efeitos irreversíveis à saúde e ameaçar a vida.

### 3.6 USO E PRODUÇÃO DO CLORO

A substância escolhida para análise nesse trabalho foi o cloro, devido à sua alta reatividade, aplicabilidade e por apresentar limite de tolerância baixo, ou seja, mesmo em pequenas concentrações, a exposição ao cloro pode provocar efeitos graves e irreversíveis à saúde.

O cloro é o décimo primeiro elemento mais abundante na litosfera e por causa da sua alta reatividade é raramente encontrado em estado livre, podendo ser obtido em gases vulcânicos e sob a forma de cloretos. Um exemplo é a água do mar, que corresponde a 2,9% em peso de cloreto de sódio e 0,3% em peso de cloreto de magnésio (SCHMITTINGER, 2011).

#### 3.6.1 Propriedades físico-químicas

De acordo com Schmittinger (2000), o cloro existe nos três estados físicos e em seu estado natural é um gás venenoso, pungente, de coloração amarelo-esverdeado e apresenta densidade superior a de um gás ideal mesmo em temperatura superior a 300°C, o que o caracteriza como um gás denso.

Algumas propriedades físicas do cloro podem ser observadas na Tabela 18.

Tabela 18 – Propriedades físicas do cloro

(continua)

Propriedades físicas	Valores
Massa atômica relativa	35,453
Ponto de fusão	-100,98°C
Ponto de ebulição	-34,05°C
Densidade crítica	565 kg/m <sup>3</sup>
Temperatura crítica	144°C

Tabela 18 – Propriedades físicas do cloro

(conclusão)

Pressão crítica	7,711 Mpa
Densidade do gás (0°C, 101,3 kPa)	3,213 kg/m <sup>3</sup>
Densidade relativa	2,48
Propriedades físicas	Valores
Entalpia de fusão ( $\Delta H_f$ )	90,33 kJ/kg
Entalpia de vaporização ( $\Delta H_v$ )	287,1 kJ/kg
Entalpia de dissociação ( $\Delta H_{diss}$ )	239,44 kJ/kg

Fonte: Autora “adaptado de” SCHMITTINGER, 2011, p. 533

De acordo com Schmittinger (2011), o cloro, flúor, bromo e o iodo constituem o grupo dos halogênios e apresentam propriedades não metálicas, sendo que sua valência é determinada pelos sete elétrons na camada externa. As ligações entre o cloro e os outros halogênios são principalmente covalentes, no entanto, nos compostos cloro-flúor e cloro-iodo, existe algum caráter iônico na ligação.

O cloro apresenta alta reatividade, o que lhe confere facilidade para se ligar a outros elementos, entretanto, a ligação com nitrogênio, oxigênio e carbono ocorre indiretamente. O cloro, na presença de sais de amônia, reage de maneira explosiva.

O cloro e o hidrogênio não reagem espontaneamente, no entanto, em temperaturas superiores a 250°C e na presença de luz, solar ou artificial, eles se combinam formando o explosivo cloreto de hidrogênio.

A maioria dos metais é resistente ao cloro seco, sendo facilmente atacados por cloro úmido, porém, na temperatura de ignição do metal, a reação entre cloro seco e o componente metálico ocorre como uma combustão, produzindo chamas. Grande parte dos cloretos metálicos apresenta solubilidade em água, com exceção à prata e ao mercúrio (SCHMITTINGER, 2011).

O cloro reage com hidrocarbonetos através de reação de substituição ou adição, formando ligações covalentes. Em reações com hidrocarbonetos insaturados, o cloro é adicionado a dupla ou tripla ligação, sendo a reação favorecida pelo aumento da luz, calor ou catalisador.



### 3.6.2 Utilização

De acordo com Schmittinger (2011), o primeiro uso industrial do cloro foi para produção de agentes branqueadores para papel e tecido, bem como para limpeza e desinfecção. Contudo, a partir de 1900, sua importância como matéria-prima para a química orgânica sintética foi notada, passando a ser utilizado na produção de produtos não clorados, tais como materiais de construção, solventes e pesticidas.

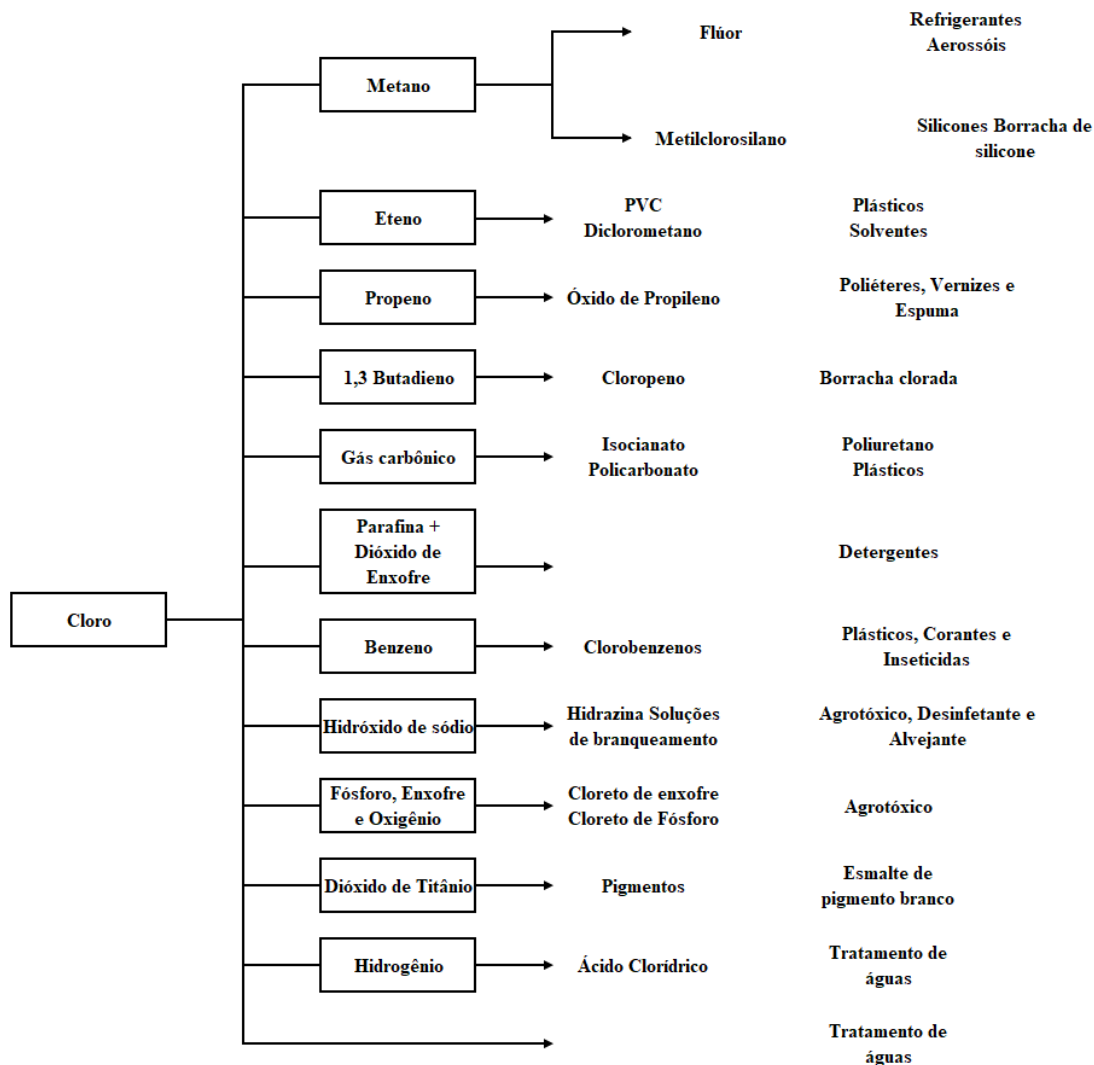
O emprego do cloro na produção de produtos inorgânicos, como ácido clorídrico e agente branqueador, ganhou espaço no mercado nas últimas décadas e vem crescendo com a produção de alguns cloretos metálicos, tais como tetracloreto de titânio, cloreto de alumínio e tetracloreto de silício. No entanto, a produção de intermediários orgânicos foi a grande responsável pelo consumo de cloro, correspondendo a 85% do uso em países desenvolvidos (SCHMITTINGER, 2011).

O cloro quando reage com o metano produz alguns solventes orgânicos, como cloreto de metila, clorofórmio e tetracloreto de carbono. A reação de cloro com butano e pentano forma hexaclorobutadieno e hexacloropentadieno, respectivamente, que são produtos utilizados como pesticidas.

A reação entre cloro e benzeno leva à formação de monoclorobenzeno, diclorobenzeno, hexaclorobenzeno, disponibilizados como solventes e pesticidas. Além dessas aplicabilidades, o monoclorobenzeno é intermediário na fabricação de anilina e corantes.

A Figura 11 demonstra os demais produtos que podem ser obtidos a partir do cloro:

Figura 11 – Produtos obtidos a partir de reações utilizando cloro



Fonte: Autora “adaptado de” SCHMITTINGER, 2011, p. 612

Os maiores produtores de cloro no mercado nacional são a Braskem, Dow Brasil e Unipar Carbocloro, com uma produção de 464.000, 415.000 e 355.000 toneladas por ano, respectivamente (ANÚARIO DA INDÚSTRIA QUÍMICA BRASILEIRA, 2015).

### 3.6.3 Sistemas de Armazenamento

O cloro é armazenado sob pressão em estado líquido e à temperatura ambiente em tanques de formato cilíndrico posicionados de maneira horizontal, conhecidos no âmbito informal como “charutos”. No sistema, a pressão corresponde à pressão de vapor do cloro a 25°C.

A capacidade máxima dos tanques corresponde a uma faixa de 300 a 400 toneladas. Grandes unidades de armazenagem operam com sistema à baixa pressão, com temperatura de - 34 °C, sob refrigeração ou compressão (SCHMITTINGER, 2000).

Qualquer risco de incêndio ou explosão deve ser eliminado, e todos os tanques devem conter uma conexão externa abaixo do nível do líquido em um aterro hermético e também uma pequena área onde o líquido deve ser coletado em caso de vazamento. Para casos de liberação de cloro accidental, deve haver um sistema de absorção ou liquefação.

De acordo com Schmittinger (2000), não é permitida qualquer substância que possa reagir com o cloro no sistema de armazenamento, além disso, a capacidade nominal do tanque não deve exceder 95% do volume total, devido ao risco de expansão que pode levar ao rompimento do tanque de armazenamento.

### 3.7 ESTUDOS DE DISPERSÃO DE CLORO NA ATMOSFERA

O crescimento populacional levou à aproximação das instalações de plantas químicas em locais urbanos, contribuindo para o desenvolvimento de estudos que visam estimar a área contaminada, caso haja o vazamento de alguma substância química.

Existem alguns *softwares* comerciais e *freewares* que estimam as consequências de uma liberação accidental de substância química através do estudo da dispersão da nuvem tóxica na atmosfera, sendo os mais utilizados: TRACE, PHAST, SCIPUFF, SLAB, HGSYSTEM, ALOHA, RMP\* Comp, DEGADIS e CFD.

Segundo Pintaric (2007), os *softwares* utilizados na análise de risco diferem em relação ao nível de complexidade, no número de cenários acidentais modelados, na quantidade de dados de entrada requeridos, na interface do usuário e no banco de dados em relação às propriedades físico-químicas das substâncias. Além disso, cada *software* tem uma maneira de apresentar os resultados, fornecer o suporte técnico e, principalmente, o custo de manutenção.

O *software* TRACE é utilizado para avaliar as consequências da liberação accidental de uma substância química na atmosfera por meio da elaboração da Análise de Riscos do Processo. Ele também permite ao usuário criar cenários fáceis e rápidos, sendo possível a exportação das informações de saídas para outros aplicativos, além disso, possui em seu banco de dados informações sobre mais de 600 componentes puros (SAFER TRACE, 2019).

O TRACE é utilizado para estudar liberações acidentais de substância com fluuabilidade neutra ou densa que ocorreram ao nível do solo ou a uma altura de referência do solo, além de conter um modelo para incêndio e explosão.

De acordo com Pinto (2013), o *software* PHAST foi desenvolvido para estimar as consequências de cada etapa de um incidente desde o momento da liberação accidental, formação de poça ou nuvem e a dispersão da nuvem tóxica. Dessa maneira, pode ser utilizado em todos os estágios de projeto e operação.

Esta ferramenta permite a importação e exportação de planilhas eletrônicas, além de possuir um banco de dados com as propriedades físico-químicas de várias substâncias químicas. Além disso, também possui modelos para analisar a descarga, dispersão, inflamabilidade e explosão.

De acordo com Hanna et al. (2008), o *software* SCIPUFF foi desenvolvido na década de 1980 com o apoio de EPRI com a finalidade de estudar as plumas provenientes de usinas elétricas. Nas décadas de 1990 e 2000, foi aprimorado pelo Departamento de Defesa dos Estados Unidos e, atualmente, também prevê o comportamento de nuvens densas. O SLAB, assim como SCIPUFF, também é um *freeware* desenvolvido na década de 1980 objetivando a análise da dispersão de nuvem densas a partir da evaporação de uma piscina.

Já o HGSYSTEM é um *freeware* desenvolvido pelo *Shell International Oil Products* para estudar a dispersão de ácido fluorídrico e gases ideais, no entanto, sofreu algumas modificações ao longo do tempo para atender também a liberações de líquidos, misturas gasosas e misturas bifásicas (WITLOX e MCFARLANE, 1994).

O *software* ALOHA, do inglês *Areal Locations of Hazardous Atmospheres*, foi desenvolvido pela *National Oceanic and Atmospheric Administration's* (NOAA's) e permite a modelagem de cenários de liberações de substância tóxicas e inflamáveis, como BLEVE (*Boiling Liquid Expanding Vapor Explosions*), incêndio em poça (*pool fires*) e jato de fogo (*jet fire*). No entanto, não realiza previsões para distâncias superiores a 10 quilômetros a partir do ponto de liberação, e isso se deve às equações utilizadas pelo *software* para realizar as previsões (PAUL, MONDAL e SHOUKAT CHOUDHURY, 2014).

Além dos *softwares* mencionados anteriormente, o RMP Comp\* e o DEGADIS também são ferramentas utilizadas na análise de riscos, através dos quais é possível determinar o comportamento da concentração média da substância tóxica em função da distância e tempo. No entanto, não foram realizados estudos para a dispersão de cloro utilizando esses *softwares*, mas mesmo assim serão descritos os seus funcionamentos.

Segundo a *United States Environmental Protection Agency* (2009), o RMP Comp\* é um *freeware* fornecido pela EPA (*Environmental Protection Agency*) e é considerado uma versão simplificada do *software* ALOHA. Para realizar a análise de risco, exige uma quantidade mínima de requisitos de entrada, sendo possível a incorporação de tabelas com pontos finais

tóxicos (*endpoints*) de diversas substâncias químicas. No entanto, apresenta previsões conservadoras devido às hipóteses simplificadoras adotadas.

O *software* DEGADIS (*dense gas dispersion*) foi desenvolvido pela Guarda Costeira dos Estados Unidos e pelo *Gas Research Institute* e é um *software* mais abrangente, quando comparado ao RMP Comp\* e ao ALOHA. Devido a sua complexidade, requer um operador com experiência em dinâmica dos fluidos e em ciência atmosférica (GUARNACCIA e HOPPE, 2007).

Fundada em 1970, a ANSYS é uma empresa pública que tem como finalidade desenvolver e comercializar *softwares* de simulação de engenharia, dentre esses se destaca o programa para a análise do fluxo de fluidos incompressíveis e compressíveis e a transferência de calor em geometrias complexas, CFD (ANSYS, 2019).

O CFD (*Computational Fluid Dynamics*) é a análise de sistemas envolvendo fluxo de fluidos, transferência de calor e fenômenos associados, como reações químicas, por meio de simulação computacional. Essa técnica abrange uma ampla gama de áreas de aplicação industrial e não industrial. Alguns exemplos são as áreas de engenharia de processos e de engenharia ambiental, em que é analisada a distribuição de poluentes e efluentes (VERSTEEG e MALALASEKERA, 1995).

Os códigos CFD são estruturados em torno dos algoritmos numéricos que podem resolver problemas de fluxo de fluido. Para fornecer acesso fácil ao seu poder de solução, todos os pacotes CFD comerciais incluem interfaces de usuário sofisticadas para inserir parâmetros de problemas e examinar os resultados.

Estudos envolvendo a aplicação desses *softwares* com o intuito de estimar a área contaminada a partir da liberação acidental de cloro têm sido realizados nos últimos anos por diferentes estudiosos.

Segundo Hanna et al. (2008), foram realizados estudos para analisar a dispersão de cloro utilizando seis *softwares* distintos: TRACE, PHAST, SCIPUFF, SLAB, SGSYSTEM e ALOHA. Aqui, o intuito não era reproduzir o acidente e, sim, analisar o desempenho dos *softwares*.

O acidente que ocorreu em Festus, Missouri, foi utilizado como base para a simulação, no qual uma mangueira de 1 polegada de um vagão contendo cloro se rompeu. As informações a respeito do acidente podem ser observadas na Tabela 19.

Tabela 19 – Informações a respeito do acidente de Festus

Massa de cloro liberada	21,8 kg
Temperatura	20°C
Velocidade do vento	5 m/s
Tempo de liberação	3 h
Altura da liberação em relação ao solo	3,5 m
Classe de estabilidade atmosférica	D

Fonte: Autora “adaptado de” Hanna et al., 2008, p. 253

Os *softwares* descritos anteriormente foram utilizados para determinar a concentração média de cloro liberado ao nível do solo, após 10 minutos do acidente, para distâncias estabelecidas, que variavam de 100 m até 25 km. Na Tabela 20, estão demonstrados os resultados obtidos.

Tabela 20 – Análise da concentração média de cloro utilizando diferentes *softwares*

Distância atingida (km)	TRACE	PHAST	SCIPUFF	SLAB	HGSYSTEM	ALOHA
	Concentração (ppm)					
0.1	1605	1137	1050	836	770	1250
0.2	468	293	180	280	481	433
0.5	84	50	10	58	80	95
1	23	14.1	2.7	17.7	15.9	27
2	6	4.1	0.8	5.2	3.64	7.2
5	_____	0.84	0.25	1.1	0.61	1.3
10	_____	0.27	0.07	0.38	0.17	0.34
25	_____	_____	_____	0.1	0.045	_____

Fonte: Autora “Adaptado de” Hanna et al., 2008, p. 254

Além da análise da concentração média, também foi estudada a máxima distância obtida pela nuvem de cloro para concentrações estabelecidas, que variavam de 2000 a 20 ppm. Na Tabela 21 é possível observar os resultados para os diferentes *softwares*.

Tabela 21 – Análise da distância atingida pela nuvem de cloro para diferentes *softwares*

Concentração (ppm)	TRACE	PHAST	SCIPUFF	SLAB	HGSYSTEM	ALOHA
	Máxima distância atingida (m)					
2000	86	63	70	_____	_____	_____
400	220	168	170	170	300	250
20	1060	837	405	900	900	1300

Fonte: Autora “adaptado de” Hanna et al., 2008, p. 254

Considerando as mesmas concentrações da análise anterior, também foi possível determinar a máxima largura atingida pela nuvem de cloro. Na Tabela 22 estão demonstrados os resultados obtidos.

Tabela 22 – Análise da largura atingida pela nuvem de cloro para diferentes *softwares*

Concentração (ppm)	TRACE	PHAST	SCIPUFF	SLAB	HGSYSTEM	ALOHA
	Máxima largura atingida (m)					
2000	14	7.4	18	_____	_____	_____
400	30	29	27	35	33	_____
20	116	105	80	88	116	_____

Fonte: Autora “adaptado de” Hanna et al., 2008, p. 254

A última análise realizada foi para determinar a máxima altura atingida pela nuvem de cloro. Foram estipulados três diferentes valores de concentração, como dito anteriormente, os quais variavam de 2000 a 20 ppm. Na Tabela 23 é possível observar os resultados obtidos para cada *software* utilizado.

Tabela 23 – Análise da altura atingida pela nuvem de cloro para diferentes *softwares*

Concentração (ppm)	TRACE	PHAST	SCIPUFF	SLAB	HGSYSTEM	ALOHA
	Máxima altura atingida (m)					
2000	2.4	5.7	4.5	_____	_____	_____
400	6	6.6	10	10	14.5	_____
20	26	28.5	44	31	25	_____

Fonte: Autora “adaptado de” Hanna et al., 2008, p. 254

Os resultados obtidos nesse estudo apresentam valores distintos quando os *softwares* são comparados, sendo que um dos motivos que justifica esse comportamento está relacionado à complexidade dos modelos matemáticos utilizados pelos *softwares* para resolver os problemas. Além disso, cada *software* requer uma quantidade de dados de entrada e, quanto mais simplificado for essa etapa, mais hipóteses serão adotadas, fazendo com que o resultado seja diferente ao observado no acidente.

Segundo Hanna et al. (2008), em todas as simulações realizadas não foi considerada a taxa de remoção de cloro, que poderia acontecer por reações químicas ou evaporação, fazendo com que a concentração média obtida seja superior às concentrações coletadas no dia do incidente.

A concordância nos cálculos de dispersão entre os *softwares* está relacionada ao módulo de origem, sendo os módulos adequados apenas para PHAST e o TRACE, enquanto o ALOHA apresenta um módulo de emissão simplificado para o estudo de caso em questão. Os modelos HGSYSTEM e SCIPUFF apresentam módulos limitados, sem recursos específicos para o cloro, que é um gás denso, enquanto o *software* SLAB não possui módulo de emissões de origem. Dessa forma, os *softwares* dependem de receber suas entradas a partir de modelos que apresentem os módulos de origem adequados ou através de cálculos separados (HANNA et al., 2008).

De acordo com Paul, Mondal e Shoukat Choudhury (2014), foram realizados outros estudos para analisar a dispersão de gás cloro em diferentes condições de superfície (urbana e rural), bem como diferentes condições climáticas e meteorológicas utilizando o *software* ALOHA.

No trabalho dos autores citados, a modelagem foi realizada considerando a liberação de 1,6 toneladas de cloro de um tanque cilíndrico horizontal em um período de 1 hora, com velocidade do vento correspondente a 3,3 m/s. O primeiro estudo levou em consideração os limites de toxicidade AEGLs, de maneira que a nuvem de cloro percorreu uma distância de 1 km com concentração superior ao AEGL – 3, sendo essa área denominada de zona vermelha. A zona laranja corresponde ao limite de toxicidade AEGL – 2, em que a concentração de cloro atingiu uma distância de 3,5 km com concentração superior à especificada. Por fim, foi realizada a modelagem para o limite de toxicidade mais brando, AEGL – 1, na qual a nuvem de cloro percorreu uma distância de 7 km com concentração maior que a determinada, sendo essa área denominada de zona amarela.

Posteriormente, foi analisada a influência da velocidade do vento para as três zonas determinadas, de maneira que o aumento da velocidade do vento reduzia a distância percorrida



pela nuvem tóxica com concentração superior ao limite de toxicidade estipulado. Na Tabela 24, é possível observar os resultados obtidos.

Tabela 24 – Influência da velocidade do vento na dispersão da nuvem tóxica

Velocidade do vento (m/s)	Zona Vermelha (km)	Zona Laranja (km)	Zona Amarela (km)
10.5	1.5	5.0	9.9
12.0	1.1	3.6	7.0
13.7	1.1	3.5	6.7
16.0	0.99	3.3	6.3
19.3	0.90	3.0	5.9

Fonte: Paul, Mondal e Shoukat Choudhury, 2014, p. 215

Segundo Paul, Mondal e Shoukat Choudhury (2014), outro parâmetro analisado foi a influência da temperatura, permitindo observar que o aumento da mesma levou ao aumento da área contaminada, devido à variação da estabilidade atmosférica que promoveu o deslocamento da nuvem tóxica. Na Tabela 25, estão demonstrados os resultados obtidos.

Tabela 25 – Influência da temperatura na dispersão da nuvem tóxica

Temperatura (°C)	Zona Vermelha (km)	Zona Laranja (km)	Zona Amarela (km)
18	0.94	3.1	6.0
25	1.0	3.4	6.4
31	1.1	3.6	7.0
37	1.3	3.8	7.5

Fonte: Paul, Mondal e Shoukat Choudhury, 2014, p. 216

Finalmente, foi analisado como as condições da superfície influenciam a dispersão da nuvem tóxica. Regiões onde existem árvores ou prédios proporcionam turbulência na atmosfera, apresentando uma melhor dispersão da nuvem e, conseqüentemente, diminuem a área contaminada. No entanto, campos abertos, como zonas rurais, onde não existe obstáculos e, portanto, turbulência mecânica atmosférica, dificultam a dispersão de nuvens, acarretando em uma área contaminada maior. Os resultados obtidos podem ser observados na Tabela 26.

Tabela 26 – Influência da rugosidade da superfície na dispersão da nuvem tóxica

Rugosidade da superfície (cm)	Zona Vermelha (km)	Zona Laranja (km)
3	1.1	7.0
5	1.1	6.7
8	0.99	6.3
10	0.96	6.2
50	0.96	6.2

Fonte: Paul, Mondal e Shoukat Choudhury, 2014, p. 216

Embora exista uma variedade de *softwares* utilizados na análise de riscos, os comerciais apresentam elevado custo e, muitas vezes, exigem do operador conhecimentos específicos de mecânica dos fluidos. Os *freewares* são pouco complexos e requerem uma quantidade mínima de informações de entrada, no entanto, fazem previsões grosseiras que, muitas vezes, distanciam da realidade (PINTARIC, 2007).

O presente trabalho tem como finalidade demonstrar o uso da ferramenta ACM do *software* ASPEN Plus® na área de análise de riscos. A maioria das empresas no âmbito químico o utilizam na área de processos, seja para analisar desvios do processo, implementar novas operações unitárias ou até mesmo para modelar processos de produção novos.

O *Aspen Custom Modeler* (ACM) é uma ferramenta do *software* ASPEN Plus® capaz de modelar e resolver sistemas através de equações de natureza algébrica e diferencial, as quais são base fundamental para descrever fenômenos físicos, tais como transporte de massa, calor e momento. Além disso, pode realizar simulações, dinâmicas e em estado estacionário, estimativas de parâmetros e otimizar processos.

Com a utilização do ACM para prever as consequências de uma liberação acidental de substância química, o qual não acrescentaria custos à empresa, seria possível a elaboração de uma análise de risco da planta química e, a partir dela, o desenvolvimento de medidas protetivas e a estimativa da área atingida.

## 4 METODOLOGIA

Este trabalho teve como finalidade propor uma alternativa para a realização de análise de riscos por meio do estudo da dispersão de substâncias tóxicas na atmosfera. Para isso, foi utilizada a ferramenta *Aspen Custom Modeler* (ACM), do *software* ASPEN Plus®, com a qual foram implementados modelos para determinar os impactos da liberação de nuvem tóxica no ambiente e para a população local.

Para a elaboração da análise de riscos, foi necessário definir as substâncias químicas envolvidas no estudo e o modelo matemático de dispersão a ser implementado, além de justificar a escolha da ferramenta utilizada.

### 4.1 DEFINIÇÃO DA SUBSTÂNCIA QUÍMICA ENVOLVIDA NO ESTUDO DE CASO

Para a realização de uma análise de riscos é fundamental conhecer as substâncias químicas envolvidas no processo e, a partir delas, é possível mensurar os impactos de uma liberação acidental.

A substância química escolhida para estudo foi o cloro por apresentar vasta aplicabilidade, sendo utilizado para a produção de solventes orgânicos, pesticidas, corantes, plásticos e, principalmente, para tratamento de água e efluentes.

Além disso, o cloro é muito reativo, o que lhe confere certa facilidade para se ligar a outros componentes e, por apresentar alta toxicidade, pode provocar efeitos graves e irreversíveis à saúde, mesmo em situações de exposição a baixas concentrações.

### 4.2 DEFINIÇÃO DOS MODELOS DE DISPERSÃO

As análises de riscos são utilizadas para identificar cenários acidentais e mensurar as consequências desses acidentes. Para isso, são empregados modelos matemáticos de dispersão, por meio dos quais é possível estimar o comportamento da nuvem tóxica na atmosfera e mensurar os impactos associados a essa liberação acidental.

Em uma primeira análise, foi utilizado o modelo de dispersão de Pasquill-Gifford, que é baseado no método estatístico e utiliza os coeficientes de dispersão estimados de acordo com a estabilidade atmosférica e o tipo de terreno, o que torna o modelo mais fácil de ser viabilizado. Este modelo é empregado na análise do comportamento de nuvens de fluabilidade neutra, no

entanto, também é usado para análise de dispersão de gases mais pesados que o ar, como o cloro, por apresentar boa correlação de resultados.

Já o modelo de dispersão de Britter e McQuaid, é utilizado para analisar a dispersão de nuvens com flutuabilidade densa e foi desenvolvido com base em análise dimensional e correlação de dados sobre dispersão de nuvem pesada, o que torna o modelo confiável para vários casos de liberação acidental de gás. Para verificar a aplicabilidade deste modelo, é necessário definir o empuxo da nuvem utilizando a Equação (32), sendo que, para valores positivos, o modelo está apto a ser utilizado.

#### 4.3 DEFINIÇÃO DO *SOFTWARE* UTILIZADO

As análises de riscos são realizadas por meio de *softwares* comerciais ou *freewares* capazes de determinar o comportamento da nuvem tóxica na atmosfera, bem como estimar a área contaminada e os impactos no meio ambiente.

Os *softwares* comerciais apresentam elevado custo de aquisição e manutenção, além de requererem operadores com experiência na área de análise de riscos e conhecimentos específicos de mecânica dos fluidos. Os *freewares* são mais simples e necessitam de menos dados de entrada, porém, adotam muitas hipóteses, cujas previsões podem se distanciar da realidade.

Neste trabalho, foi proposta a utilização da ferramenta *Aspen Custom Modeler* (ACM), do *software* ASPEN Plus®, que já é empregado na maioria das indústrias químicas para estudo de processos e contempla uma base de dados de substâncias químicas e propriedades termodinâmicas úteis para as avaliações.

A utilização do ACM na área de análise de riscos não requer a aquisição de novos programas, operadores com conhecimentos e treinamentos específicos e, além disso, agrega outra aplicação ao *software* ASPEN Plus®.

#### 4.4 IMPLEMENTAÇÃO DO MODELO DE DISPERSÃO DE PASQUILL-GIFFORD NO ACM

Para a implementação do modelo de dispersão de Pasquill-Gifford na ferramenta *Aspen Custom Modeler* (ACM), foi necessário criar um arquivo no *software* ASPEN Plus® com as substâncias químicas envolvidas no estudo (cloro, água, oxigênio e nitrogênio), para que a ferramenta acessasse as propriedades físico-químicas das mesmas.

Na primeira etapa, que consiste no estudo de dispersão de nuvens de flutuabilidade neutra e no qual as propriedades físico-químicas não são relevantes, a construção desse arquivo se deve à necessidade de o ACM exigir a configuração da lista de componentes envolvidos na simulação antes da construção dos modelos. O passo a passo dessa etapa pode ser observado no Apêndice A.

Posteriormente, foi necessário importar para o ACM o arquivo com as substâncias químicas utilizadas no estudo, sendo anexado ao *Aspen Custom Modeler* o arquivo do ASPEN Plus®, também descrito detalhadamente no Apêndice A.

Com a vinculação do arquivo referente às substâncias químicas ao ACM, foram implementados os modelos matemáticos de dispersão para o estudo da liberação de cloro, os quais foram baseados na declaração de variáveis e de parâmetros, como também de equacionamentos.

Para a implementação dos modelos, foram declarados como variáveis a massa de cloro liberada ( $Q_m^*$ ) ou o fluxo mássico ( $Q_m$ ), a velocidade do vento ( $u$ ), o tempo de liberação da substância ( $t$ ), a distância percorrida pela substância ( $x$ ) e a concentração média da substância ( $\bar{C}$ ).

Além dessas variáveis, foram definidos os coeficientes de dispersão  $\sigma_x$ ,  $\sigma_y$  e  $\sigma_z$ , que variam conforme o tipo de liberação, contínua ou instantânea, e estão relacionados com a distância percorrida pela nuvem tóxica. Os coeficientes de dispersão apresentam valores distintos conforme a classe de estabilidade atmosférica, como pode ser observado na Tabela 10 para liberação contínua (pluma) e na Tabela 11 para liberação instantânea (*puff*).

As classes de estabilidade atmosférica são representada por letras de “A” até “F”, em que: “A” é utilizado para atmosfera extremamente instável, “B” é referente à atmosfera moderadamente instável, “C” é empregado para atmosfera levemente instável, “D” é utilizado para atmosfera neutra, “E” é empregado à atmosfera levemente estável e, por fim, “F” é referente à atmosfera moderadamente estável, como pode ser observado na Tabela 9.

Para finalizar o modelo matemático de dispersão, foram introduzidas as equações necessárias para se observar o comportamento da concentração média de cloro a diferentes distâncias.

Primeiramente, foram implementados os modelos para liberações ao nível do solo, sendo utilizada a Equação (20) para obter o comportamento da concentração média em função da distância para a liberação instantânea (*puff*).

A construção do algoritmo detalhado do modelo de dispersão para liberação instantânea (*puff*) ao nível do solo pode ser observada no Apêndice A.

Para o modelo de dispersão para liberação contínua (pluma), foi considerada a Equação (28).

Para a implementação dos modelos matemáticos de dispersão, que estudam a liberação a uma determinada altura de referência do nível do solo, foi necessário realizar as mesmas etapas descritas anteriormente, bem como declarar a altura de liberação.

A altura de referência para a liberação accidental foi determinada com base no armazenamento de cloro, o qual é pressurizado, mantido em sua forma líquida e em temperatura ambiente em tanques de formato cilíndrico posicionados de maneira horizontal, popularmente nomeados como “charutos”, os quais apresentam altura de 4 metros.

Para estimar a concentração média de cloro ( $\bar{C}$ ) em função da distância, foi preciso utilizar outra equação, levando em consideração a altura de liberação ( $h$ ). Dessa maneira, foi empregada a Equação (25) para a liberação instantânea (*puff*) e a Equação (31) para liberação contínua (pluma), ambas a 4 metros do nível do solo.

Em seguida, a partir dos modelos matemáticos de dispersão, foram realizadas simulações com a finalidade de estimar a variação da concentração média de cloro em função da distância percorrida pela nuvem tóxica.

Para as simulações referentes à liberação instantânea (*puff*) foi adotada a liberação accidental de 10 kg de cloro, dos quais, foi considerado que toda a massa liberada foi vaporizada. Já para a liberação contínua (pluma), foi adotada a liberação de 10 kg de cloro em um intervalo de 10 minutos, o que corresponde a um fluxo mássico de 0,0167 kg/s. As análises foram realizadas para todas as classes de estabilidade atmosférica, considerando a velocidade de vento de 2 m/s.

Na Tabela 27, estão demonstrados de maneira simplificada as variáveis, parâmetros e equações utilizadas para a implementação do modelo de dispersão de Pasquill-Gifford.

Tabela 27 – Metodologia para a implementação do modelo de dispersão de Pasquill-Gifford

Variáveis	Equacionamento		Análises realizadas	Finalidade
Massa de cloro $(Q_m^* = 10kg)$	Liberação instantânea $(puff)$	Liberação contínua $(pluma)$	Classes de estabilidade atmosférica	Avaliar o comportamento da concentração média de cloro em função da distância percorrida pela nuvem tóxica
Fluxo mássico de cloro $(Q_m = 0,0167kg/s)$				
Velocidade de vento $(u = 2\text{ m/s})$				
Tempo de liberação $(t = 500\text{ s})$				
Coeficientes de dispersão $(\sigma_x, \sigma_y, \sigma_z)$	Equações (20) e (25)	Equações (28) e (31)	Liberação ao nível do solo	
Altura de liberação $(h = 4\text{ m})$			Liberação a 4 metros do nível do solo	
Distância percorrida pela nuvem $(h = 4\text{ m})$				
Concentração média de cloro $(\bar{C})$				

Fonte: Autora

#### 4.5 CONSTRUÇÃO DAS NUVENS ISOCÊNTRICAS

A nuvem isocêntrica, ou isocentro, é definida como pontos de igual concentração ao redor do limite da nuvem tóxica e é estimada a partir da estipulação de um limite de toxicidade, velocidade de vento e tempo, com o intuito de determinar a área contaminada.

Para a construção das nuvens isocêntricas foram utilizados como base os modelos de dispersão para liberação contínua e instantânea implementados anteriormente, sendo adicionado a estes um limite de toxicidade.

O limite de toxicidade adotado foi o *Emergency Response Planning Guideline* (ERPG – 2), uma vez que foi desenvolvido para proteger a saúde da população, é o mais utilizado para planos de emergência e corresponde a uma concentração na qual a população pode estar exposta sem desenvolver efeitos ou sintomas irreversíveis à saúde. Além disso, apresenta valores de concentração compatíveis com a concentração letal para 50% da população exposta (CL50) e é indicado pelo órgão vigente, que no estado de São Paulo corresponde a Companhia Ambiental do Estado de São Paulo (CETESP). No caso do cloro, essa concentração corresponde a 3 ppm (CROWL; LOUVAR, 2002).

Em contrapartida, o ERPG – 1 apresenta uma concentração muito baixa, cujos efeitos são leves ou imperceptíveis, e o ERPG – 3 considera uma concentração muito elevada capaz de causar efeitos irreversíveis à saúde e ameaçar a vida.

A construção da nuvem isocêntrica para a liberação instantânea (*puff*) ao nível do solo apresentou uma metodologia distinta em relação às demais, sendo necessário adicionar novas equações: Equações (19), (21) e (22).

Também foram adicionadas novas variáveis,  $y$ , *raio* e *ConcI*, em que o  $y$  representa a largura da nuvem, o raio corresponde ao termo  $(x - ut)$  e *ConcI* se refere ao limite de toxicidade adotado (ERPG – 2).

Para o caso da liberação instantânea ao nível do solo, a concentração da borda da nuvem é representada por  $\bar{C}(x, 0, 0, t)$  e equivale a 10% da concentração no centro da mesma, dada por  $\bar{C}(ut, 0, 0, t)$ . Dessa maneira, a Equação (21) determina a concentração na borda da nuvem e, a partir dela, foi possível determinar o raio  $(x - ut)$  utilizando a Equação (19).

Com os valores das concentrações no centro da nuvem combinados ao limite de toxicidade adotado, foi possível obter a largura da nuvem utilizando a Equação (22) e, dessa maneira, construir a nuvem isocêntrica.



O modelo de dispersão implementado para construção da nuvem isocêntrica para a liberação instantânea (*puff*) ao nível do solo pode ser observada no Apêndice B.

As demais nuvens isocêntricas foram construídas de maneira semelhante, sendo necessária apenas a adição da variável referente à largura da nuvem ( $y$ ) e as equações que correlacionam a concentração da borda da nuvem com a largura da mesma: Equações (24), (27) e (30).

A construção da nuvem isocêntrica correspondente à liberação instantânea (*puff*) a uma determinada altura do nível do solo, cujo valor corresponde a 4 metros, foi realizada por meio da adição da Equação (24).

O termo  $\bar{C}(x, y, 0, t)$  da Equação (24) corresponde ao limite de toxicidade adotado, 3 ppm, sendo possível determinar os valores de  $y$  e, conseqüentemente, as dimensões da nuvem tóxica.

Para a construção da nuvem isocêntrica de uma liberação contínua (*pluma*) ao nível do solo, foi adicionada ao modelo matemático de dispersão a Equação (27).

Por fim, foi construída a nuvem isocêntrica para a liberação contínua (*pluma*) a 4 metros do nível do solo utilizando a Equação (30). Para se obter a largura da nuvem tóxica ( $y$ ), o termo  $\bar{C}(x, y, 0)$  da mesma equação foi igualado ao limite de toxicidade adotado, ERPG – 2, cuja concentração corresponde a 3 ppm.

Para a construção das nuvens isocêntricas foram consideradas a liberação accidental da mesma quantidade de cloro utilizada para analisar o modelo de dispersão de Pasquill-Gifford informada anteriormente, ou seja, 10 kg para liberação instantânea (*puff*), e um fluxo mássico de 0,0167 kg/s para liberação contínua (*pluma*).

As análises foram realizadas considerando as classes de estabilidade atmosférica estável (F), neutra (D) e instável (A), e velocidade do vento igual a 2 m/s.

A Tabela 28 exemplifica as alterações realizadas no modelo de dispersão de Pasquill-Gifford implementado com o intuito de se obter as nuvens isocêntricas e, dessa maneira, estimar a área contaminada pela liberação accidental de cloro.

Tabela 28 – Metodologia para a construção das nuvens isocêntricas

Variáveis	Equacionamento		Análises realizadas	Finalidade
Largura da nuvem tóxica ( $y$ )	Liberação instantânea ( <i>puff</i> )	Liberação contínua (pluma)	Classes de estabilidade “A”, “D” e “F”	Determinar as dimensões da nuvem tóxica com o intuito de estimar a área atingida pela liberação acidental de cloro
Raio da nuvem tóxica ( $x - ut$ )			Liberação ao nível do solo	
Concentração do limite de toxicidade ( $Conc1$ )	Equações (19), (21), (22) e (24)	Equações (27) e (30)	Liberação a 4 metros do nível do solo	

Fonte: Autora

#### 4.6 IMPLEMENTAÇÃO DO MODELO DE DISPERSÃO DE BRITTER E MCQUAID NO ACM

Para a implementação do modelo de dispersão de Britter e McQuaid na ferramenta *Aspen Custom Modeler* (ACM), foi utilizado o arquivo criado anteriormente no *software* ASPEN Plus® com as substâncias químicas envolvidas no estudo (cloro, água, oxigênio e nitrogênio), para que o ACM tivesse acesso às propriedades físico-químicas das mesmas.

A implementação do modelo foi dividida em duas fases: a primeira consistiu em determinar as propriedades físico-químicas do cloro líquido armazenado sob pressão e a segunda corresponde à determinação das propriedades físico-químicas do cloro gasoso liberado na atmosfera.

Para a primeira fase, foram declaradas as variáveis pressão ( $P_i$ ) e temperatura ( $T_i$ ) de armazenamento de cloro (a qual corresponde a 25°C) a composição do cloro ( $z$ ) e a pressão de vaporização do cloro ( $P_{vap}$ ).

Para o cálculo das propriedades físico-químicas das substâncias envolvidas no estudo, tais como densidade, pressão de vapor, temperatura de ebulição e as propriedades relativas aos flashes, foram utilizadas as *Procedure* que são sub-rotinas de cálculo do *software* ASPEN Plus®,

Para determinar a pressão de armazenamento de cloro ( $P_i$ ), foi realizada uma *Procedure*, que tem como base o banco de dados do *software* ASPEN Plus® e relaciona a temperatura inicial e a composição do cloro para estimar a pressão de armazenamento do mesmo.

A partir das condições de armazenamento e a composição do cloro, foi realizada uma segunda *Procedure* com o intuito de estimar a entalpia molar específica do cloro ( $H\_mol$ ).

Para a segunda fase, foram declaradas as variáveis temperatura ( $T_f$ ) e a pressão ( $P_f$ ) após a liberação do cloro na atmosfera, a qual corresponde a 1 bar, a temperatura ambiente ( $T_a$ ), a massa de cloro liberada ( $Q_m^*$ ) ou o fluxo mássico ( $Q_m$ ), o volume liberado ( $V_0$ ) ou o fluxo volumétrico ( $q_0$ ), o tempo de liberação ( $Rd$ ), a composição do ar ( $z_l$ ), a velocidade do vento ( $u$ ), a distância percorrida pelo cloro ( $x$ ), a concentração do limite de toxicidade adotado ( $C_m$ ) e a concentração do cloro liberado ( $C_0$ ).

O modelo de dispersão de Britter e McQuaid é empregado para as classes de estabilidade neutra ou levemente instável, nas quais a velocidade de vento varia entre 3 a 6 m/s. Para velocidade de vento inferior a 3 m/s, o comportamento da nuvem tóxica é predominantemente difusivo, não sendo possível estimar o ponto de transição ( $x_t$ ). Dessa forma, foi adotado um valor intermediário de velocidade de vento, que corresponde a 4 m/s.

Para determinar a temperatura após a liberação de cloro na atmosfera ( $T_f$ ), foi realizada uma nova *Procedure*, a qual relaciona a entalpia molar específica ( $H\_mol$ ), estimada anteriormente, com a pressão final para ponderar a temperatura da nuvem de cloro na atmosfera.

A partir das condições finais e da composição do cloro, foi realizada a quinta *Procedure* com o objetivo de estimar a densidade do cloro gasoso. Por fim, foi estimada a densidade do ar através da *Procedure* que relaciona a temperatura ambiente ( $T_a$ ), a pressão após a liberação do cloro na atmosfera ( $P_f$ ) e a composição do ar ( $z_l$ ).

Na sequência, foram declaradas variáveis empregadas para classificar o tipo de liberação e a flutuabilidade da nuvem, tais como força de empuxo da nuvem ( $g_0$ ), dimensões da fonte de liberação contínua ( $D_c$ ) ou dimensões da fonte de liberação instantânea ( $D_i$ ), critério da flutuabilidade ( $Cr_1$ ) e critério da liberação ( $Cr_2$ ).

O critério de flutuabilidade da nuvem é determinado de maneira distinta para o tipo de liberação, sendo empregada a Equação (35) para liberação contínua (pluma) e a Equação (36) liberação instantânea (*puff*).

Para estimar o critério de liberação é utilizada a Equação (42), independentemente do tipo de liberação, no entanto, apresenta resultados distintos para a liberação contínua (pluma) e para a liberação instantânea (*puff*). Nesse sentido, a liberação é considerada instantânea quando

o critério ( $Cr_2$ ) apresentar resultado igual ou inferior a 0,6 e para liberação contínua o resultado deve ser igual ou superior a 2,5.

Além dessas variáveis, foram definidos alfa ( $\alpha$ ) e beta ( $\beta$ ) para representar os eixos dos gráficos da correlação para dispersão de gás denso proposta por Britter e McQuaid, os quais variam conforme o tipo de liberação, instantânea (*puff*) ou contínua (pluma), e estão relacionados com a distância percorrida pela nuvem tóxica, velocidade do vento, empuxo da nuvem e volume ou vazão volumétrica. Para liberação contínua (pluma),  $\alpha$  e  $\beta$  são definidos conforme as Equações (37) e (38). Já para liberação instantânea (*puff*),  $\alpha$  e  $\beta$  são estimados utilizando as Equações (40) e (41).

O modelo de dispersão de Britter e McQuaid determina a máxima distância atingida pela nuvem tóxica, na qual o regime de dispersão predominante apresenta características de gás denso. Para isso, são relacionados os eixos,  $\alpha$  e  $\beta$ , com as curvas do gráfico representadas pela razão entre a concentração do limite de toxicidade adotado ( $C_m$ ) e a concentração na fonte de liberação ( $C_0$ ).

As variáveis utilizadas na implementação do modelo de dispersão de Britter e McQuaid podem ser observadas na Tabela 29.

Tabela 29 – Variáveis utilizadas no modelo de dispersão de Britter e McQuaid

(continua)

Variáveis		
Armazenamento de cloro	Liberação de cloro	Modelo de dispersão
Pressão de armazenamento ( $P_i$ )	Pressão da nuvem de cloro ( $P_f = 1 \text{ bar}$ )	Força de empuxo ( $g_0$ )
	Temperatura da nuvem de cloro ( $T_f$ )	
	Temperatura ambiente ( $T_a = 25^\circ\text{C}$ )	Dimensionamento da fonte de liberação contínua ( $D_c$ )
Temperatura de armazenamento ( $T_i = 25^\circ\text{C}$ )	Composição do ar ( $z_1$ )	Dimensionamento da fonte de liberação instantânea ( $D_i$ )
	Velocidade do vento ( $u = 4 \text{ m/s}$ )	
	Distância percorrida pela nuvem tóxica ( $x$ )	

Tabela 29 – Variáveis utilizadas no modelo de dispersão de Britter e McQuaid

(conclusão)

Variáveis		
Armazenamento de cloro	Liberação de cloro	Modelo de dispersão
Composição do cloro ( $z$ )	Massa de cloro liberada ( $Q_m^* = 10 \text{ kg}$ )	Critério de fluutuabilidade ( $Cr_1$ )
	Fluxo mássico de cloro liberado ( $Q_m = 0,0167 \text{ kg/s}$ )	
	Volume de cloro liberado ( $V_0$ )	
Pressão de vaporização do cloro ( $P_{vap}$ )	Fluxo volumétrico de cloro liberado ( $q_0$ )	Critério de liberação ( $Cr_2$ )
	Tempo de liberação ( $Rd$ )	
	Concentração do limite de toxicidade adotado ( $C_m$ )	
	Concentração no ponto de liberação ( $C_0$ )	

Fonte: Autora

Para a implementação do modelo de dispersão de Britter e McQuaid no ACM, foram utilizadas as equações das curvas do gráfico e as que definem  $\alpha$  e  $\beta$ , como pode ser observado na Tabela 12 para liberação contínua (pluma) e na Tabela 13 para liberação instantânea (*puff*).

Primeiramente, foi necessário definir a concentração do limite de toxicidade adotado ( $C_m$ ), a concentração na fonte de liberação ( $C_0$ ) e verificar se liberação era ou não isotérmica. O limite de toxicidade adotado foi o *Emergency Response Planning Guideline* (ERPG – 2), como dito anteriormente, o qual corresponde a uma concentração de 3 ppm de cloro.

A concentração na fonte de liberação foi estimada a partir da Equação (39), além disso, a liberação de cloro ocorre de maneira não isotérmica, sendo necessária a correção da concentração do limite de toxicidade utilizando a Equação (43).

Na Tabela 30, estão demonstrados os equacionamentos, as análises realizadas e também a finalidade da implementação do modelo de dispersão de Britter e McQuaid.

Tabela 30 – Metodologia para implementação do modelo de dispersão de Britter e McQuaid

Equacionamento			Análises realizadas	Finalidade
Liberação instantânea ( <i>puff</i> )	Liberação contínua (pluma)	Modelo de dispersão	Liberação ao nível do solo	Determinar a relação entre a concentração do limite de toxicidade corrigido para liberação não isotérmica e a concentração no ponto de liberação
Equações (40) e (41)	Equações (37) e (38)			
Tabela 13	Tabela 12	Equações (39) e (43)	Classe de estabilidade neutra (D)	

Fonte: Autora

A implementação do modelo de dispersão de Britter e McQuaid para liberação instantânea (*puff*) é demonstrada em detalhes no Apêndice C.

A relação entre a concentração do limite de toxicidade corrigido ( $C_m'$ ) e a concentração na fonte de liberação ( $C_0$ ) apresentou valor muito pequeno e, por isso, extrapolou o limite do gráfico de correlação para dispersão de gás denso proposto por Britter e McQuaid.

Esse comportamento demonstra que, na distância para a nuvem tóxica atingir a concentração referente ao limite de toxicidade, a flutuabilidade apresenta características de gás neutro e, por isso, o modelo de gás denso é aplicado até a distância onde ocorre a mudança de flutuabilidade da nuvem.

Posteriormente, foi implementado o modelo de transição, o qual se baseia em um modelo de dispersão de nuvem densa, sendo o modelo de Britter e McQuaid utilizado para estimado o ponto de transição da flutuabilidade da nuvem ( $x_t$ ). Em seguida, foram definidas a distância virtual ( $x_v$ ), a distância na qual a nuvem tóxica atinge o limite de toxicidade ( $x_{nb}$ ) e a máxima distância percorrida pela nuvem com concentração correspondente ao limite de toxicidade adotado ( $x$ ) utilizando o modelo de dispersão de Pasquill-Gifford, visto que já houve a transição da flutuabilidade da nuvem.

Para isso, foi determinada a relação entre a concentração no ponto de transição ( $C_x$ ) e a concentração no ponto de liberação ( $C_0$ ) utilizando a Equação (49) para liberação contínua

(pluma) e Equação (55) para liberação instantânea (*puff*). Esses valores foram combinados aos alfas ( $\alpha$ ) estimados anteriormente, sendo possível determinar beta ( $\beta$ ) e, conseqüentemente, o ponto de transição ( $x_t$ ).

Em seguida, foram calculadas as distâncias virtuais ( $x_v$ ), que correspondem ao ponto no qual a concentração de fluabilidade neutra é igual à concentração de gás denso e, para isso, foi utilizada a Equação (50) para liberação contínua (pluma) e a Equação (56) para liberação instantânea (*puff*).

Depois, foram determinadas as distâncias na qual a nuvem tóxica atinge a concentração referente ao limite de toxicidade ( $x_{nb}$ ), que para o estudo em questão corresponde ao ERPG – 2, que equivale a 3 ppm. Para isso foram utilizadas as equações mencionadas anteriormente. Por fim, foi estimada a máxima distância que a nuvem tóxica atinge com a concentração referente ao limite de toxicidade adotado ( $x$ ), a partir da fonte de liberação, utilizando a Equação (51).

Assim como nas demais análises, foram consideradas a liberação acidental de 10 kg de cloro, para liberação instantânea (*puff*) e um fluxo mássico de 0,0167 kg/s para liberação contínua (pluma). No entanto, para as análises relativas ao modelo de dispersão de nuvem densa, foi considerada velocidade de vento de 4 m/s, devido à estabilidade da atmosférica utilizada. A metodologia simplificada da implementação do modelo de transição está demonstrada na Tabela 31.

Tabela 31 – Metodologia para implementação do modelo de transição

Variáveis	Equacionamento		Finalidade
Concentração no ponto de transição ( $Cx$ )	Liberação instantânea ( <i>puff</i> )	Liberação contínua (pluma)	Analisar a dispersão da nuvem de cloro e determinar o ponto de transição da fluabilidade da nuvem
Ponto de transição ( $x_t$ )			
Distância virtual ( $x_v$ )	Equações (55) e (56)	Equações (49) e (50)	
Distância para atingir o limite de toxicidade ( $x_{nb}$ )			

Fonte: Autora

No Apêndice D, é demonstrada a implementação do modelo de transição para liberação instantânea (*puff*), o qual é baseado nos modelos de Britter e McQuaid e de Pasquill-Gifford.

#### 4.7 SIMULAÇÃO DOS ESTUDOS DE CASOS OBTIDOS NA LITERATURA

O artigo *Comparison of Six Widely – Used Dense Gas Dispersion Models for Three Recent Chlorine Railcar Accidents* dos autores Hanna et al. (2008) aborda o acidente na cidade de Festus, Missouri, onde 21,9 toneladas de cloro foram liberados acidentalmente de um vagão durante 3 horas, sendo que a fonte de liberação de cloro estava posicionada a uma altura de 3,5 metros do nível do solo.

Na ocasião, a temperatura ambiente era 20°C com velocidade de vento de aproximadamente 5 m/s, o que caracteriza a classe de estabilidade atmosférica “D”. Para a análise da área contaminada, foi considerado como concentração tóxica o valor de 20 ppm.

De acordo com Hanna et al. (2008), as análises das consequências da liberação acidental de cloro foram realizadas por meio da utilização dos *softwares* de análises de riscos TRACE, PHAST, SCIPUFF, SLAB, HGSYSTEM e ALOHA.

A partir dos dados apresentados sobre o acidente no artigo citado, foram realizadas simulações com o intuito de validar o algoritmo do modelo de dispersão de Pasquill-Gifford implementado na ferramenta ACM, sendo estimada a máxima distância e largura obtidas pela nuvem de cloro com concentração de até 20 ppm.



## 5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os modelos de dispersão de Pasquill-Gifford e Britter e McQuaid foram implementados no *Aspen Custom Modeler* (ACM) com a finalidade de estimar os impactos de uma liberação acidental de cloro.

A primeira análise se baseou no modelo de dispersão de Pasquill-Gifford, sendo possível validar o modelo implementado a partir de informações fornecidas na literatura a respeito do acidente de Festus, no estado americano de Missouri. Em seguida, foi estudado o comportamento da concentração de cloro em função da distância percorrida pela nuvem tóxica, além de determinar a área contaminada por meio da construção das nuvens isocêntricas.

A segunda análise foi realizada com base no modelo de dispersão de nuvem densa de Britter e McQuaid, o qual possibilitou estimar o ponto de transição da flutuabilidade da nuvem, ou seja, a distância a partir da qual a nuvem se comporta com flutuabilidade neutra. Os resultados da implementação desses modelos no ACM são apresentados e discutidos neste capítulo.

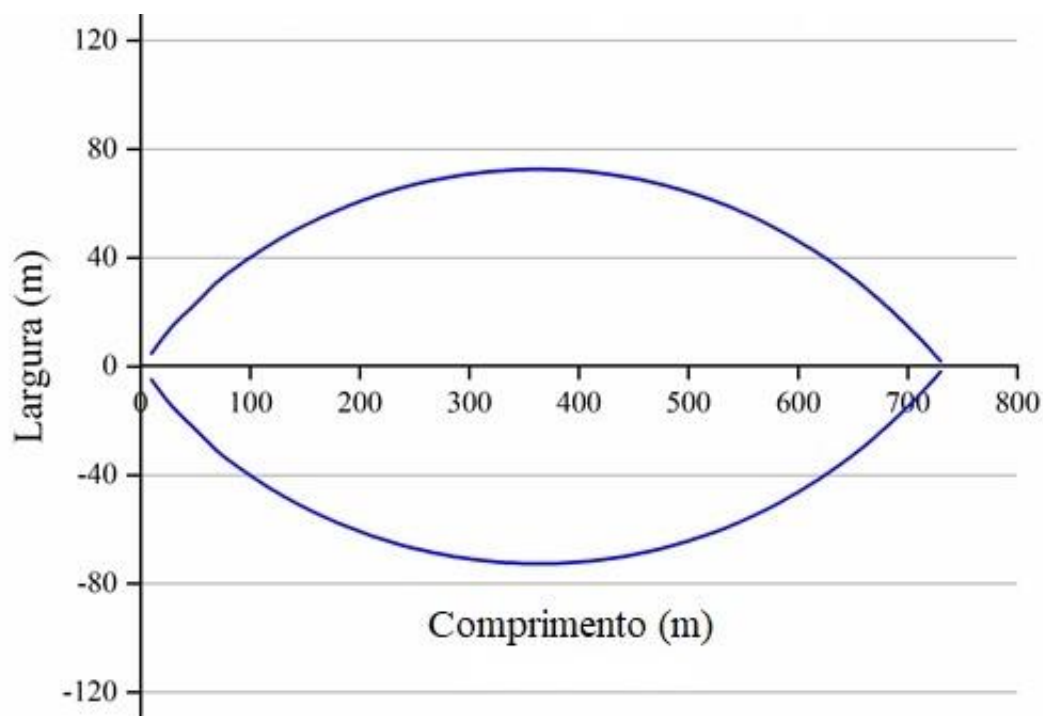
### 5.1 ANÁLISE DOS ESTUDOS DE CASOS OBTIDOS NA LITERATURA

O modelo de dispersão de Pasquill-Gifford implementado na ferramenta ACM foi validado utilizando como base casos de estudos obtidos na literatura. Para isso, foram coletadas as informações do artigo *Comparison of Six Widely – Used Dense Gas Dispersion Models for Three Recent Chlorine Railcar Accidents*, dos autores Hanna et al. (2008), no qual seis *softwares* de análise de riscos são comparados para uma mesma situação: PHAST, TRACE, ALOHA, HGSYSTEM, SCIPUFF e SLAB.

O artigo aborda o acidente que ocorreu na cidade de Festus, no estado americano de Missouri, no dia 14 de agosto de 2002, em que a mangueira conectada ao vagão de armazenamento de cloro se rompeu, levando à liberação acidental de 21,9 toneladas de cloro em um período de 3 horas. No dia do acidente, fazia 20°C e a velocidade do vento era de aproximadamente 5 m/s, o que caracteriza a classe de estabilidade atmosférica neutra. A fonte de liberação do cloro estava posicionada a 3,5 metros de altura em relação ao nível do solo.

A partir desses dados, foi utilizado o modelo de dispersão de Pasquill-Gifford para a construção da nuvem isocêntrica correspondente à liberação contínua a uma altura de referência do nível do solo, como pode ser observada na Figura 12.

Figura 12 – Nuvem isocêntrica da validação do modelo de dispersão de Pasquill-Gifford



Fonte: Autora

A nuvem de cloro formada no acidente de Festus apresentou comprimento de 730,0 metros a partir da fonte de liberação e largura máxima de 72,6 metros com concentração superior ao limite de toxicidade adotado, que corresponde a 20 ppm. Os dados utilizados na construção da nuvem isocêntrica podem ser observados no Apêndice E.

É apropriado lembrar que o modelo de dispersão de Pasquill-Gifford não considera taxa de remoção de cloro, que pode ocorrer por reação ou evaporação, além de que foi considerado que todo cloro liberado é evaporado. O mesmo pode se dizer a respeito dos *softwares* mencionados anteriormente.

Dentre os seis *softwares* estudados, apenas o PHAST e o TRACE apresentam módulos de emissão de origem adequados, ou seja, que são capazes de estimar a quantidade de substância liberada. Portanto, são os que apresentam os resultados mais confiáveis.

Os demais *softwares* operam a partir de módulos de emissão de origem simplificados ou limitados, o que requer como dado de entrada a taxa de liberação, que, muitas vezes é superestimada e apresenta como resultados distâncias maiores.

De acordo com Hanna et al. (2008), a nuvem isocêntrica construída utilizando o *software* TRACE atingiu a distância de 1060,0 metros, a partir da fonte de liberação, com largura máxima de 116,0 metros, com concentração superior ao limite de toxicidade adotado.

Já o *software* PHAST apresentou uma nuvem com dimensões reduzidas, sendo possível notar o comprimento referente a 837,0 metros e largura máxima de 105,0 metros.

As dimensões da nuvem isocêntrica proveniente do acidente de Festus foram estimadas pelos *softwares* ACM, TRACE e PHAST e podem ser observadas na Tabela 32.

Tabela 32 – Resultados obtidos para *softwares* de análise de riscos distintos

<i>Softwares</i>	ACM	TRACE	PHAST
Comprimento (m)	730,0	1060,0	837,0
Largura (m)	72,6	116,0	105,0

Fonte: Autora

As nuvens isocêntricas construídas a partir das mesmas condições de liberação apresentaram resultados coerentes, de maneira que a distância estimada para atingir o limite de toxicidade utilizando o modelo de dispersão de Pasquill-Gifford foi 13% menor em relação ao resultado obtido pelo *software* PHAST e 30% menor quando comparado ao *software* TRACE.

Já em relação às larguras das nuvens tóxicas, o modelo de dispersão de Pasquill-Gifford apresentou dimensão em torno de 30% menor em relação aos dois *softwares* comentados anteriormente.

Dessa maneira o modelo de dispersão de Pasquill-Gifford implementado no *Aspen Custom Modeler* (ACM) apresentou resultados coerentes e satisfatórios que comprovam a aplicabilidade da ferramenta para mensurar os riscos de uma planta química, sendo possível realizar análises como as de *softwares* comerciais.

## 5.2 ANÁLISE DO COMPORTAMENTO DA CONCENTRAÇÃO MÉDIA AO LONGO DA DISTÂNCIA

Uma das análises realizadas tem como finalidade determinar o gradiente de concentração média de cloro em função da distância percorrida pela nuvem tóxica, levando em consideração ambos os tipos de liberação, instantânea (*puff*) e contínua (*pluma*).

Para as simulações, foi adotada uma distância de referência de até 1.000 metros a partir do ponto de liberação da substância tóxica, devido à limitação do modelo de dispersão de Pasquill-Gifford, que apresenta boa correlação de resultados para distâncias entre 100 metros e 10 quilômetros da fonte de liberação.

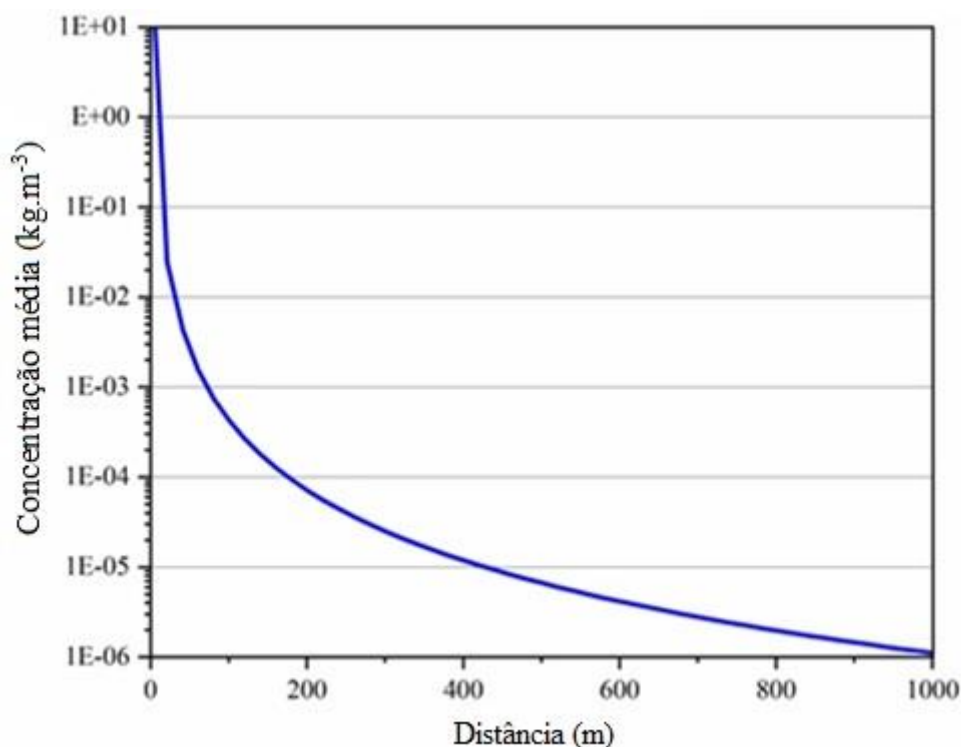
Para liberação instantânea (*puff*), a condição do terreno não é levada em consideração para determinar o coeficiente de dispersão, entretanto, para liberação a contínua (pluma) foi necessário definir se a condição de liberação era urbana ou rural.

O avanço tecnológico característico das últimas décadas proporcionou o desenvolvimento e a expansão das indústrias, bem como o surgimento de novas, que passaram a se instalar cada vez mais próximas da população. Dessa maneira, foi definida a condição urbana para analisar o comportamento da concentração média de cloro em função da distância.

Para a condição urbana, os coeficientes de dispersão ( $\sigma$ ) utilizados na determinação da concentração média são estimados por equações algébricas, porém, as classes de estabilidade “A” e “B”, assim como as “E” e “F”, apresentam a mesma equação e, conseqüentemente, o mesmo gradiente de concentração em função da distância percorrida pela nuvem tóxica.

O comportamento da concentração média em função da distância percorrida pela nuvem tóxica para liberação instantânea (*puff*) ao nível do solo considerando a classe de estabilidade atmosférica “A” pode ser observado na Figura 13.

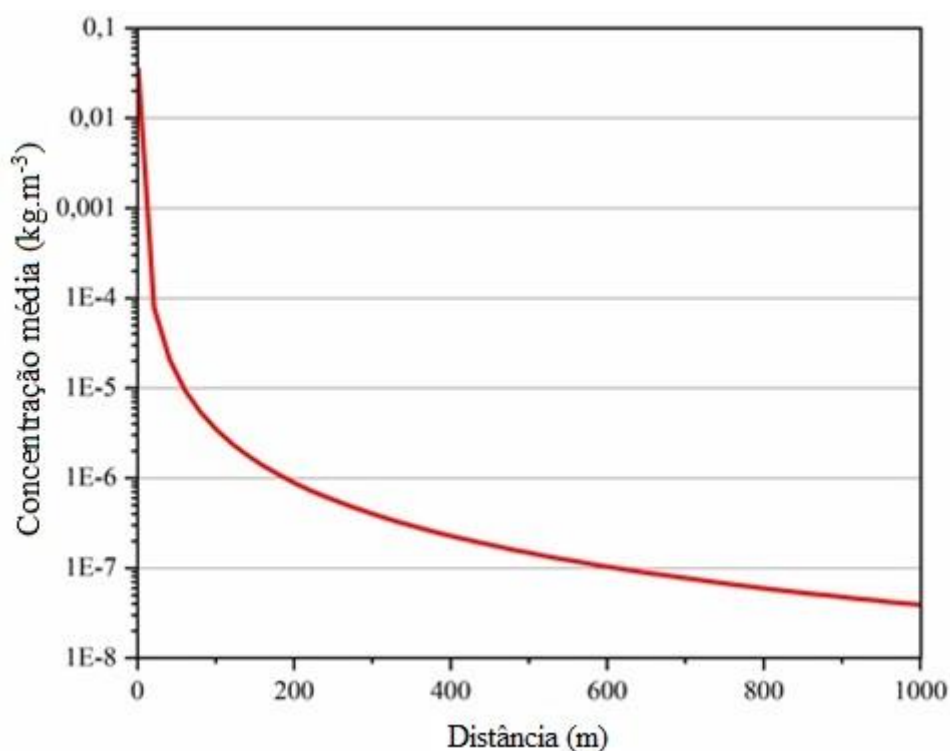
Figura 13 – Comportamento da concentração em função da distância para liberação instantânea ao nível do solo, considerando a classe de estabilidade “A”



Fonte: Autora

Já na Figura 14 pode ser observado o gradiente de concentração média ao longo da distância percorrida pela nuvem tóxica para liberação contínua (pluma), considerando, também, a classe de estabilidade atmosférica “A”.

Figura 14 – Comportamento da concentração em função da distância para liberação contínua ao nível do solo, considerando a classe de estabilidade “A”



Fonte: Autora

Ao comparar a Figura 13 e a Figura 14, é possível notar que, embora as liberações apresentem características distintas, o gradiente da concentração média ao longo da distância percorrida pela nuvem tóxica apresenta o mesmo comportamento, de maneira que a concentração média de cloro tende a diminuir exponencialmente após a diluição promovida pelo ar atmosférico.

No entanto, ao observar os valores das concentrações médias para as respectivas liberações é possível notar que a liberação instantânea (*puff*) é responsável pela maior concentração, sendo a concentração média inicial referente a 65,3 kg/m<sup>3</sup>, devido à emissão de cloro na atmosfera acontecer de maneira imediata.

Já para liberação contínua (pluma), o valor da concentração média é consideravelmente menor, sendo a concentração média inicial de 3.10<sup>-2</sup> kg/m<sup>3</sup>, em virtude de a emissão de cloro

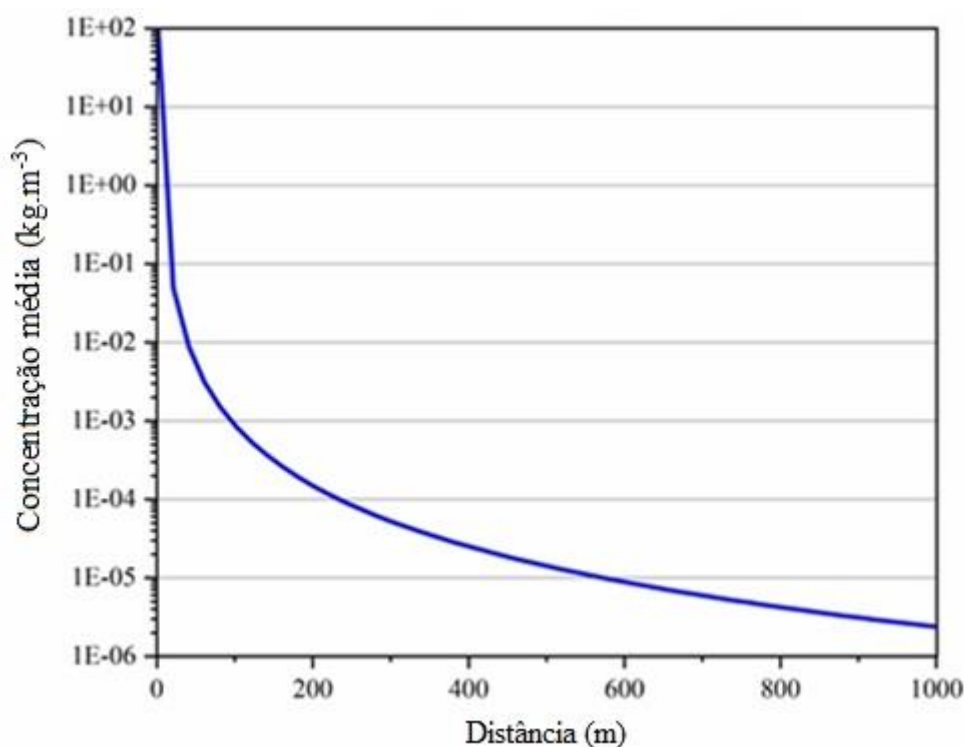
no ambiente ocorrer de forma ponderada, ao longo do tempo, resultando em uma concentração pequena.

Além disso, foram determinadas as taxas de decaimento, que correspondem à redução da concentração média de cloro no ponto final de análise, ou seja, a 1.000 metros da liberação. Para liberação instantânea (*puff*) foi notada uma taxa de decaimento de  $-1,31.10^{-1} \text{ kg/m}^3.\text{s}$ , enquanto que para liberação contínua (pluma) o valor obtido corresponde a  $-6,91.10^{-5} \text{ kg/m}^3.\text{s}$ .

Os dados utilizados para a construção dos gráficos referentes à análise do comportamento da concentração média ao longo da distância para a classe de estabilidade atmosférica “A” podem ser observados no Apêndice F.

Em seguida, foram construídos gráficos para analisar o comportamento da concentração média em função da distância percorrida pela nuvem tóxica, considerando a classe de estabilidade atmosférica “B”. Na Figura 15, é demonstrado o gradiente de concentração média em função da distância para liberação instantânea (*puff*).

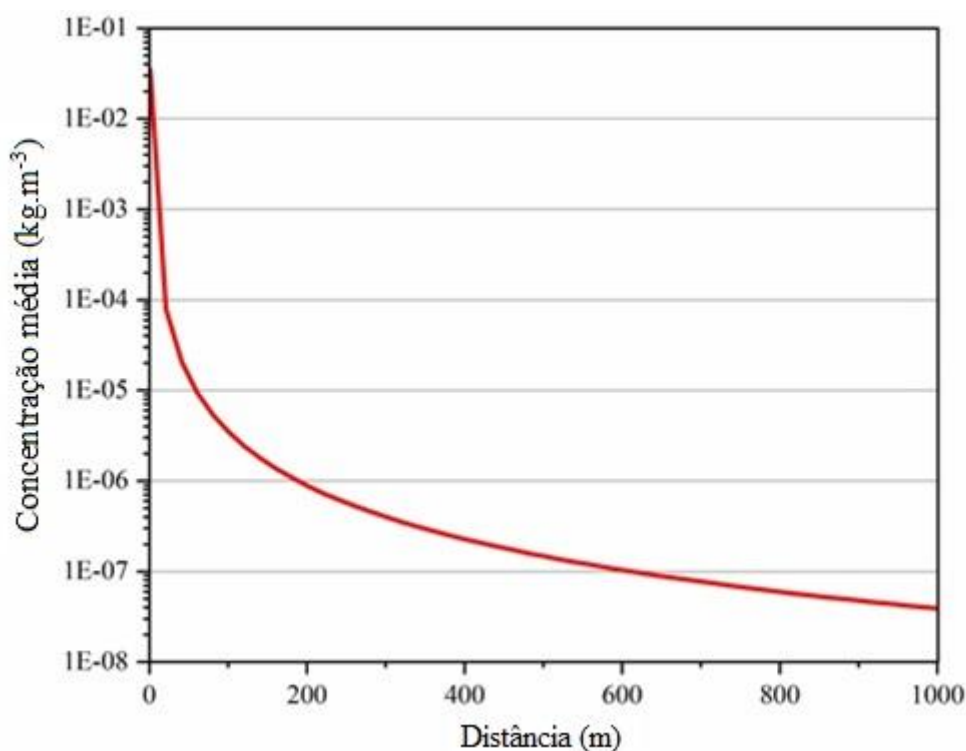
Figura 15 – Comportamento da concentração em função da distância para liberação instantânea ao nível do solo, considerando a classe de estabilidade “B”



Fonte: Autora

O comportamento da concentração média ao longo da distância percorrida pela nuvem tóxica para liberação contínua (pluma) ao nível do solo, levando em consideração a classe de estabilidade “B”, pode ser observado na Figura 16.

Figura 16 – Comportamento da concentração em função da distância para liberação contínua ao nível do solo, considerando a classe de estabilidade “B”



Fonte: Autora

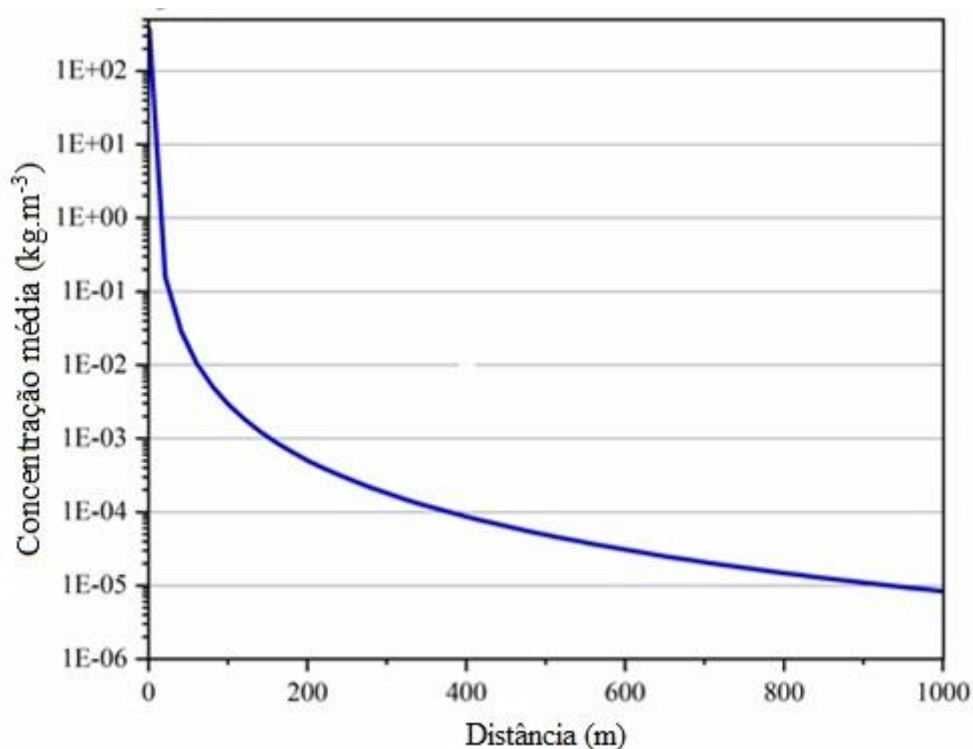
Ao analisar a Figura 15 e a Figura 16, é possível observar que o gradiente de concentração em função da distância apresenta o mesmo comportamento para liberações distintas, como dito anteriormente.

Entretanto, ao comparar a concentração média inicial para a liberação instantânea (*puff*), considerando a classe de estabilidade “B”, 122,2 kg/m<sup>3</sup>, com a obtida para a classe de estabilidade atmosférica “A” é possível observar um aumento significativo dessa concentração, que corresponde ao dobro da concentração média inicial determinada anteriormente. Além disso, a taxa de decaimento estimada corresponde a  $-2,44 \cdot 10^{-1} \text{ kg/m}^3 \cdot \text{s}$ .

Os dados utilizados para analisar o comportamento da concentração média ao longo da distância para a classe de estabilidade atmosférica “B” são apresentados no Apêndice F.

Posteriormente, foram realizadas as simulações para a classe de estabilidade atmosférica “C”. O comportamento da concentração média em função da distância percorrida pela nuvem tóxica para liberação instantânea (*puff*) pode ser observado na Figura 17.

Figura 17 – Comportamento da concentração em função da distância para liberação instantânea ao nível do solo, considerando a classe de estabilidade “C”

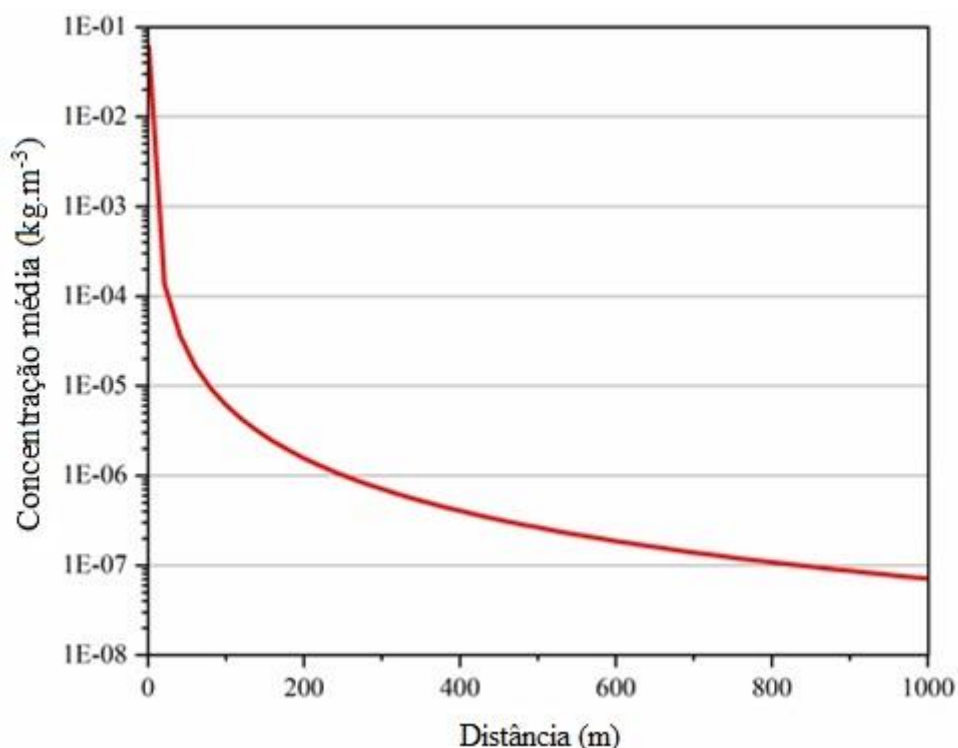


Fonte: Autora

Na Figura 18 é possível observar o gradiente da concentração média em função da distância para liberação contínua (pluma), levando em consideração a classe de estabilidade “C”.



Figura 18 – Comportamento da concentração em função da distância para liberação contínua ao nível do solo, considerando a classe de estabilidade “C”



Fonte: Autora

Ao observar a Figura 17, a qual corresponde a liberação instantânea (*puff*), é possível constatar que houve um aumento significativo na concentração média inicial para a classe de estabilidade “C”, 373,5 kg/m<sup>3</sup>, o qual corresponde a um aumento de mais de três vezes em relação à classe de estabilidade atmosférica anterior.

Já na Figura 18, e que é observado o gradiente de concentração média em função da distância para liberação contínua (pluma), também foi notado um aumento na concentração média inicial, 6.10<sup>-2</sup> kg/m<sup>3</sup>, o qual corresponde a um aumento de 100% quando comparada à concentração média inicial para a classe de estabilidade atmosférica “B”.

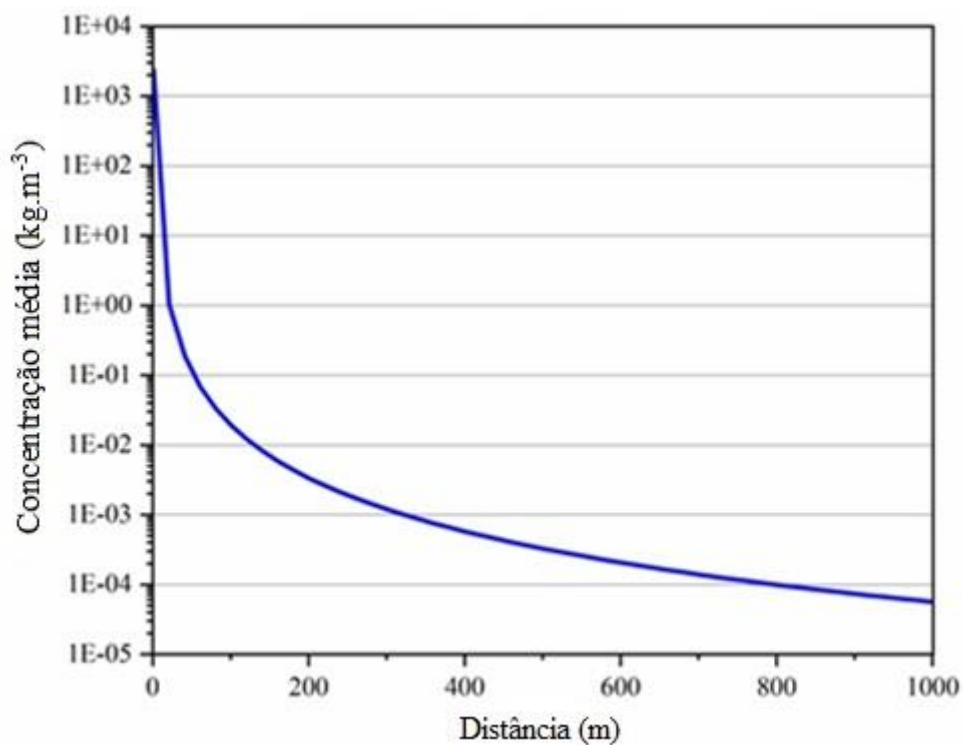
As taxas de decaimento determinadas para liberação instantânea (*puff*) e liberação contínua (pluma) foram de -7,47.10<sup>-1</sup> kg/m<sup>3</sup>.s e -1,21.10<sup>-4</sup> kg/m<sup>3</sup>.s, respectivamente.

Os dados utilizados para construção dos gráficos que relacionam a concentração média com a distância percorrida pela nuvem para a classe de estabilidade atmosférica “C” também estão demonstrados no Apêndice F.

Em seguida, foram construídos gráficos para analisar o comportamento da concentração média em função da distância percorrida pela nuvem tóxica, considerando a classe de

estabilidade atmosférica “D”. Na Figura 19, é exposto o gradiente de concentração média em função da distância para liberação instantânea (*puff*).

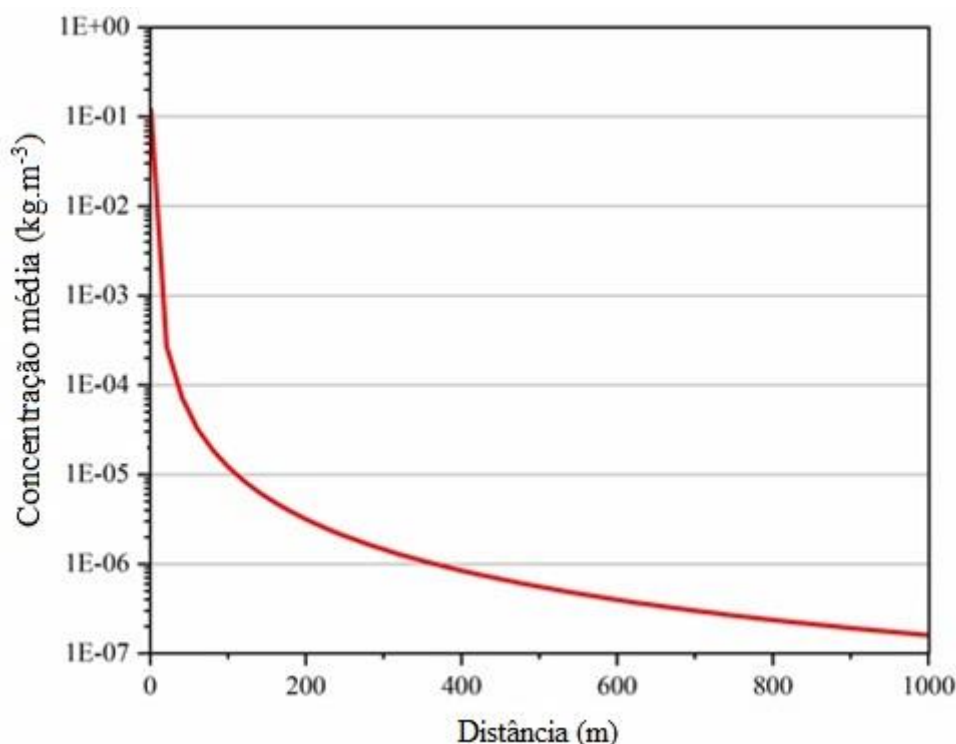
Figura 19 – Comportamento da concentração em função da distância para liberação instantânea ao nível do solo, considerando a classe de estabilidade “D”



Fonte: Autora

O gradiente de concentração média em função da distância para liberação contínua pode ser observado na Figura 20.

Figura 20 – Comportamento da concentração em função da distância para liberação contínua ao nível do solo, considerando a classe de estabilidade “D”



Fonte: Autora

Por meio da Figura 19 e da Figura 20, é possível analisar o comportamento da concentração média de cloro em função da distância percorrida pela nuvem tóxica para liberação instantânea (*puff*) e contínua (pluma), respectivamente.

Para liberação instantânea (*puff*), foi observado um aumento na concentração média inicial para a classe de estabilidade neutra, 2351,6 kg/m<sup>3</sup>, o qual equivale a seis vezes à concentração média inicial obtida para a classe de estabilidade “C”.

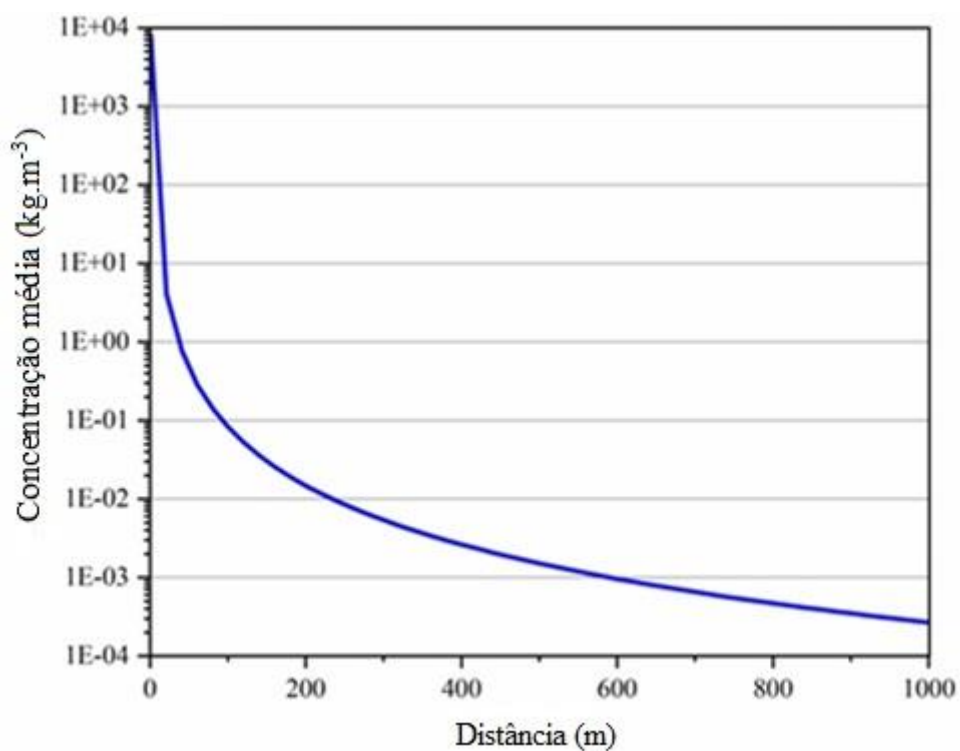
A concentração média inicial para liberação contínua (pluma), 1,2.10<sup>-2</sup> kg/m<sup>3</sup>, também obteve um aumento considerável quando comparada à classe de estabilidade anterior, em que foi atestado um aumento de 100%.

Também foram determinadas as taxas de decaimento para ambos os tipos de liberação, sendo a referente a liberação instantânea (*puff*) de -4,70 kg/m<sup>3</sup>.s e a para liberação contínua (pluma) correspondente a -2,37.10<sup>-4</sup> kg/m<sup>3</sup>.s.

No Apêndice F, estão demonstrados os dados utilizados para a construção do gradiente de concentração média em função da distância para a classe de estabilidade “D”.

Depois, foram realizadas as análises para se obter o gradiente de concentração média em função da distância para a classe de estabilidade “E”. Dessa maneira, a Figura 21 ilustra esse comportamento para a liberação instantânea (*puff*).

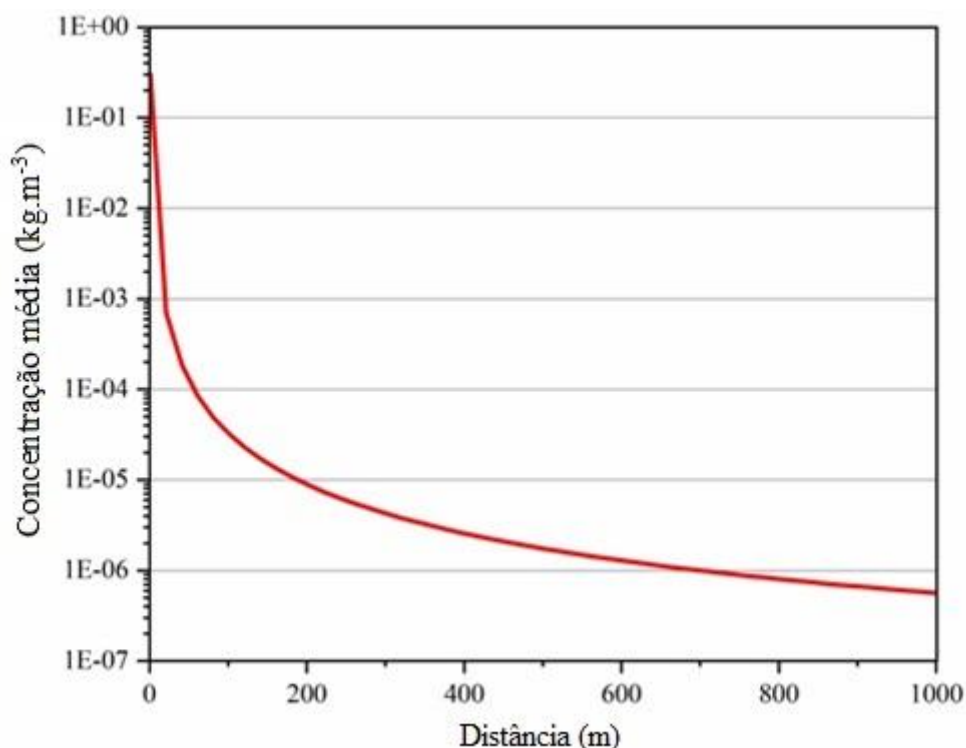
Figura 21 – Comportamento da concentração em função da distância para liberação instantânea ao nível do solo, considerando a classe de estabilidade “E”



Fonte: Autora

O comportamento da concentração média em função da distância percorrida pela nuvem tóxica para liberação contínua (pluma) é demonstrado na Figura 22.

Figura 22 – Comportamento da concentração em função da distância para liberação contínua ao nível do solo, considerando a classe de estabilidade “E”



Fonte: Autora

Ao observar o comportamento da concentração média em função da distância para a liberação instantânea (*puff*), considerando a classe de estabilidade atmosférica “E”, como demonstrado na Figura 21, é possível notar novamente um aumento no valor da concentração média inicial,  $7936,7 \text{ kg/m}^3$ , de maneira que a mesma tenha mais que triplicado em relação à classe de estabilidade anterior.

Na Figura 22, é possível observar o aumento significativo na concentração média inicial também para liberação contínua (pluma),  $3.10^{-1} \text{ kg/m}^3$ , o que corresponde a um aumento de quase três vezes quando comparada à concentração inicial obtida para a classe de estabilidade atmosférica “D”.

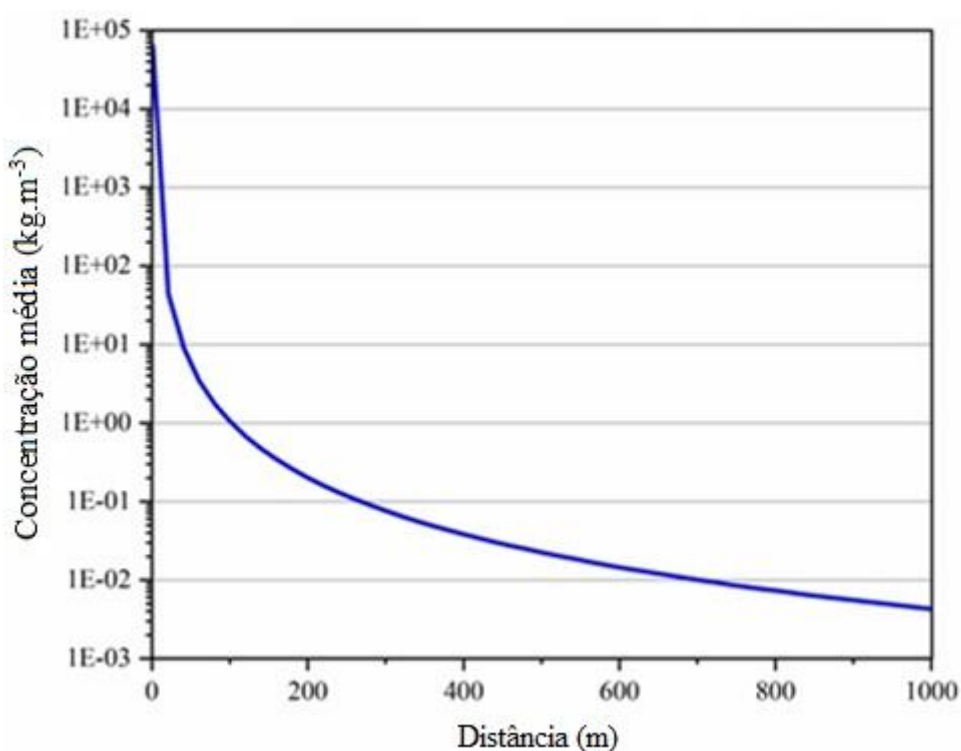
Além disso, foram determinadas as taxas de decaimento, as quais corresponde a  $-15,90 \text{ kg/m}^3.\text{s}$  e  $-6,04.10^{-4} \text{ kg/m}^3.\text{s}$  para liberação instantânea (*puff*) e contínua (pluma), respectivamente.

Os dados utilizados na construção dos gráficos de concentração média em função da distância estão demonstrados em detalhes no Apêndice F.

Por fim, foram realizadas as últimas análises ao nível do solo, nas quais foram levantados os dados para a construção dos gráficos de concentração média ao longo da distância para a classe de estabilidade “F”.

O gradiente de concentração média em função da distância percorrida pela nuvem tóxica para liberação instantânea (*puff*) pode ser observado na Figura 23.

Figura 23 – Comportamento da concentração em função da distância para liberação instantânea ao nível do solo, considerando a classe de estabilidade “F”



Fonte: Autora

Ao observar o comportamento da concentração média ao longo da distância percorrida pela nuvem tóxica para todas as classes de estabilidade atmosférica, foi possível notar que há um aumento da concentração média conforme à evolução da classe de estabilidade, de forma que a concentração média inicial para a classe de estabilidade “F”, 63493,6kg/m<sup>3</sup>, apresentou um aumento de oito vezes em relação à classe de estabilidade “E”.

Já para a classe de estabilidade atmosférica “A”, esse aumento foi ainda mais significativo, correspondendo a um aumento de quase 1.000 vezes, uma vez que, quanto mais estável for a classe de estabilidade atmosférica, menor é a turbulência mecânica atmosférica e,

portanto, menores são os movimentos verticais do ar, dificultando a dispersão da nuvem tóxica e aumentando a concentração de cloro no ambiente.

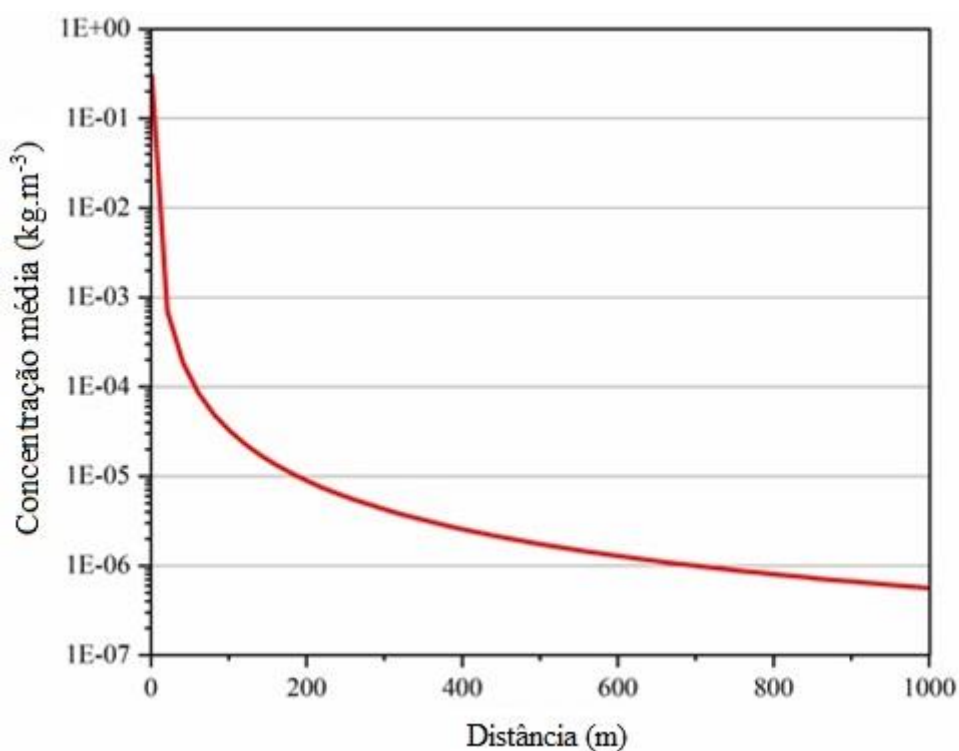
A taxa de decaimento determinada para liberação instantânea (*puff*), considerando a classe de estabilidade moderadamente estável, ou seja, “F”, apresentou o maior valor absoluto, o qual corresponde a  $-127,00 \text{ kg/m}^3 \cdot \text{s}$ .

Ao analisar as taxas de decaimento estimadas para as liberações instantânea (*puff*) e contínua (pluma) ao nível do solo, foi observado que com o aumento da estabilidade atmosférica, ocorre uma redução da taxa de decaimento, devido à baixa turbulência mecânica atmosférica que minimiza os movimentos verticais do ar.

Dessa maneira, a influência da estabilidade da atmosfera é perceptível nos primeiros segundos da interação entre a nuvem tóxica e o ar atmosférico.

O gradiente de concentração em função da distância percorrida pela nuvem tóxica, levando em consideração a liberação contínua (pluma) e a classe de estabilidade atmosférica “F” está demonstrado na Figura 24.

Figura 24 – Comportamento da concentração em função da distância para liberação contínua ao nível do solo, considerando a classe de estabilidade “F”



Fonte: Autora

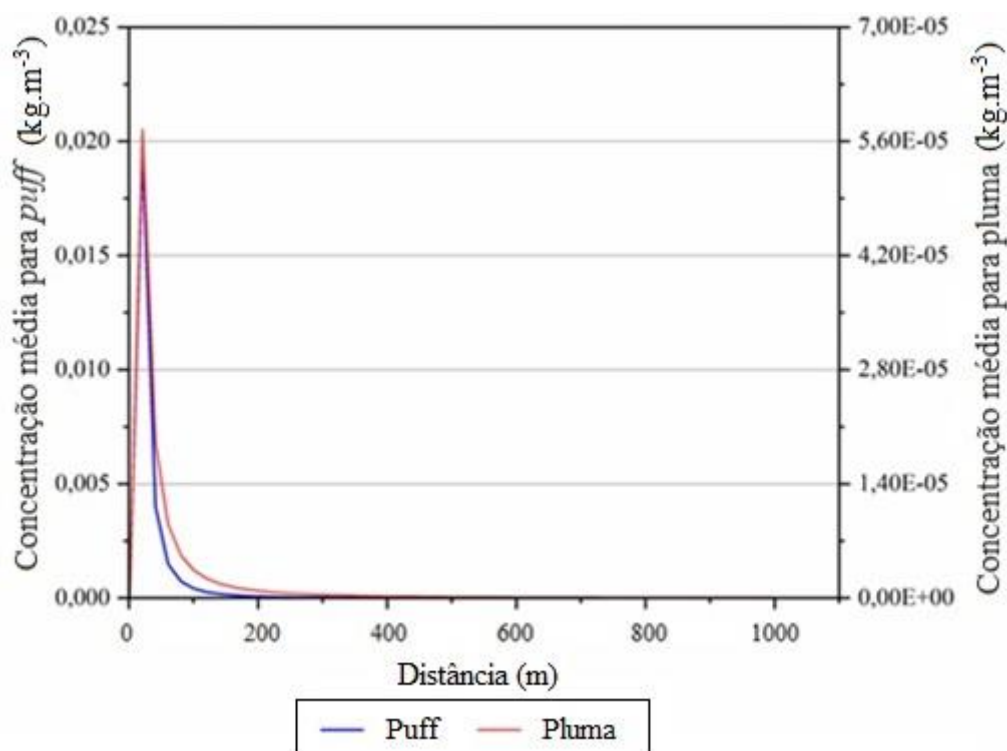
Para liberação contínua (pluma) também houve um aumento significativo da concentração média conforme a classe de estabilidade atmosférica se tornava mais estável. Dessa forma, a concentração média inicial aumentou em nove vezes em relação à classe de estabilidade “A”.

O Apêndice F traz os dados para o levantamento da concentração média em função da distância para todas as classes de estabilidade atmosférica.

Posteriormente, foi analisado o comportamento da concentração média de cloro em função da distância percorrida pela nuvem, quando a liberação acontece a uma altura de referência do solo. Como dito anteriormente, esse valor de referência foi baseado no sistema de armazenamento de cloro, cuja altura varia até 4 metros.

Todas as classes de estabilidade atmosférica foram consideradas, sendo a primeira análise realizada para a classe de estabilidade “A”, extremamente instável. Na Figura 25, é possível observar o comportamento para as liberações instantânea (*puff*) e contínua (pluma).

Figura 25 – Comportamento da concentração em função da distância para liberação a 4 metros do nível do solo, considerando a classe de estabilidade “A”



Fonte: Autora



Ao observar a Figura 25, é possível notar que o comportamento da concentração média em relação à distância para as liberações instantânea (*puff*) e contínua (pluma) apresentam comportamentos semelhantes.

É válido lembrar que as análises são realizadas para quantificar a concentração média da substância tóxica ao nível do solo onde está localizada a população, mesmo para liberações que ocorrem a uma altura qualquer do solo. Dessa maneira, perto da fonte de liberação, a concentração média é muito pequena, isso porque a nuvem tóxica apresenta uma trajetória descendente, o que leva certo tempo até chegar ao chão, onde são determinadas as concentrações médias.

Posteriormente, a concentração média tende a aumentar até atingir a concentração média máxima, em seguida ocorre a diminuição da concentração média rapidamente devido à dispersão e diluição da nuvem.

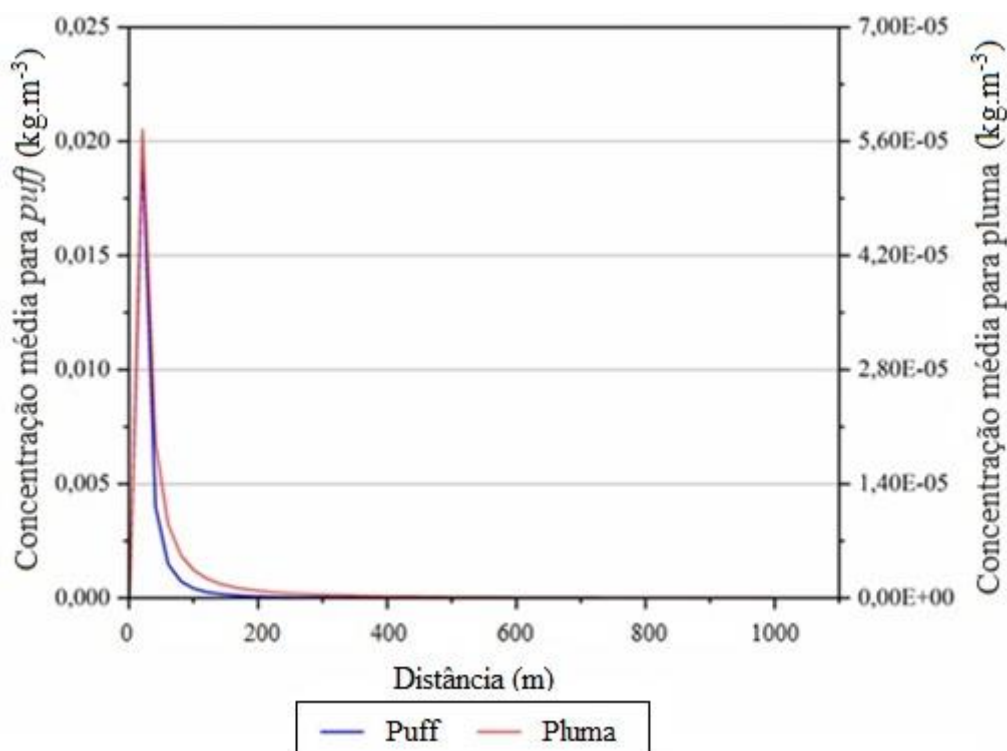
A máxima concentração média obtida para liberação instantânea (*puff*) está posicionada a 20,0 metros da fonte de liberação e correspondente a  $2.10^{-2} \text{ kg/m}^3$ . Assim como observado para as liberações ao nível do solo, a liberação contínua (pluma) apresenta menor concentração média, sendo a máxima concentração média obtida também a 20,0 metros da fonte de liberação, cujo valor corresponde a  $6.10^{-5} \text{ kg/m}^3$ .

Para as liberações a uma certa altura de referência do solo também foram determinadas as taxas de decaimento, sendo a taxa referente a liberação instantânea (*puff*) de  $-4,00.10^{-5} \text{ kg/m}^3.\text{s}$ , enquanto que para liberação contínua (pluma) o valor obtido foi de  $-1,17.10^{-7} \text{ kg/m}^3.\text{s}$ .

Os dados utilizados na construção dos gráficos que relacionam concentração média de cloro com a distância percorrida pela nuvem tóxica para as liberações instantânea (*puff*) e contínua (pluma) estão demonstrados no Apêndice F.

Em seguida, foram realizadas as análises do gradiente de concentração média em função da distância para a classe de estabilidade “B”, classificada como moderadamente instável. A Figura 26 demonstra o comportamento das concentrações para liberação instantânea (*puff*) e contínua (pluma).

Figura 26 – Comportamento da concentração em função da distância para liberação a 4 metros do nível do solo, considerando a classe de estabilidade “B”



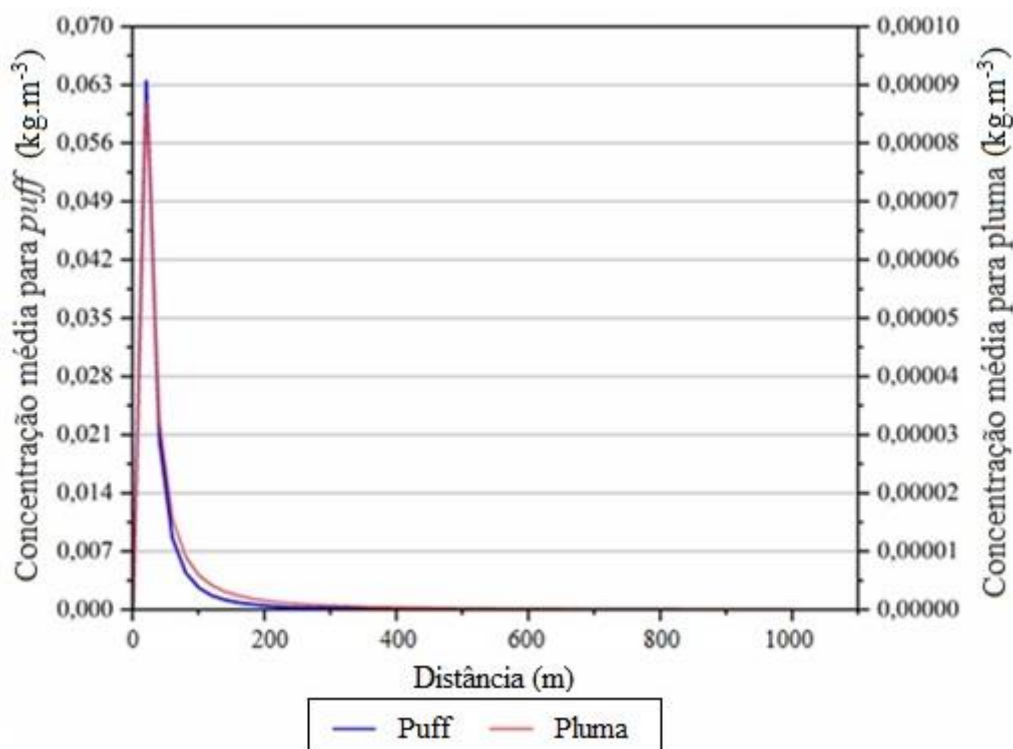
Fonte: Autora

Ao observar a Figura 26, foi possível notar que a máxima concentração média obtida para liberação instantânea (*puff*) está localizada a 20,0 metros da fonte de liberação e corresponde a  $3,5 \cdot 10^{-2} \text{ kg/m}^3$ . Assim, foi observado um aumento de 75% na máxima concentração média em relação à classe de estabilidade atmosférica “A”. Além disso, a taxa de decaimento estimada para liberação instantânea (*puff*) corresponde a  $-7,15 \cdot 10^{-5} \text{ kg/m}^3 \cdot \text{s}$ .

No Apêndice F, podem ser observados os dados utilizados para a construção do comportamento da concentração média de cloro em função da distância para a classe de estabilidade atmosférica “B”.

Em seguida, foram analisados os valores do gradiente da concentração média em função da distância percorrida pela nuvem de cloro para a classe de estabilidade atmosférica “C”, moderadamente instável. Esse comportamento pode ser observado na Figura 27.

Figura 27 – Comportamento da concentração em função da distância para liberação a 4 metros do nível do solo, considerando a classe de estabilidade “C”



Fonte: Autora

Ao analisar a Figura 27, é possível perceber que a máxima concentração média obtida para liberação instantânea (*puff*) se encontra a 20,0 metros da fonte de liberação e cujo valor corresponde a  $6 \cdot 10^{-2} \text{ kg/m}^3$ , sendo observado um aumento de 71% na máxima concentração média de cloro em relação a classe de estabilidade atmosférica “B”.

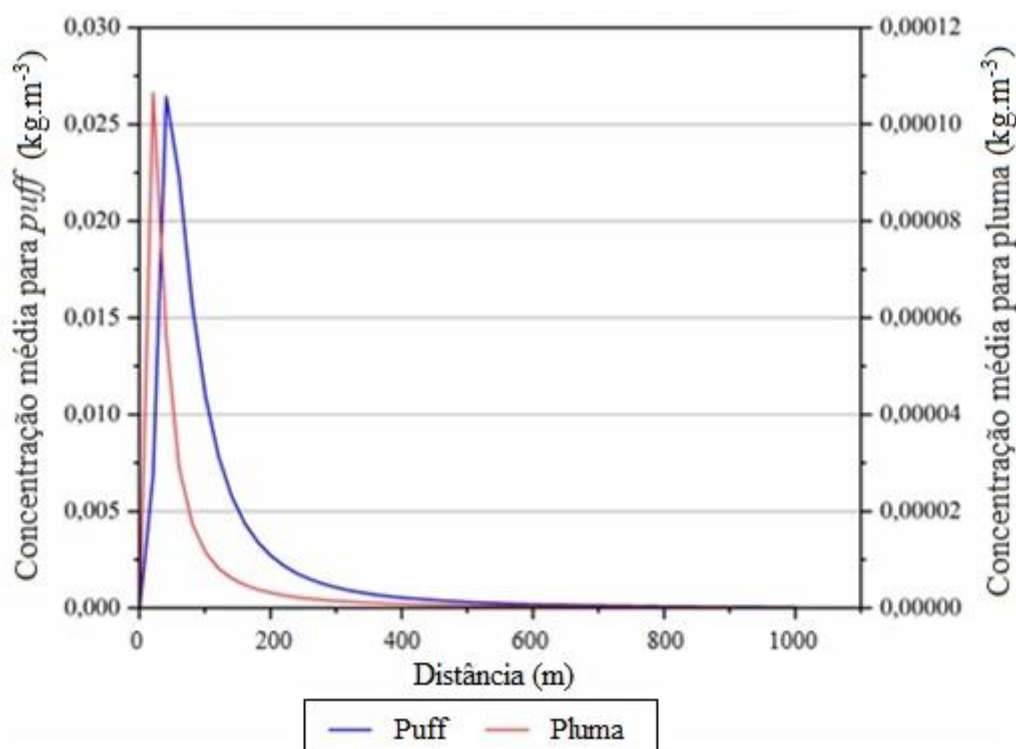
Para liberação contínua (pluma), a máxima concentração média foi obtida também a uma distância de 20,0 metros em relação a fonte de liberação e corresponde a  $9 \cdot 10^{-5} \text{ kg/m}^3$ . Dessa maneira, foi observado um aumento de 50% em relação a classe de estabilidade atmosférica anterior.

Além disso, foram determinadas as taxas de decaimento, cujos valores correspondem a  $-1,29 \cdot 10^{-4} \text{ kg/m}^3 \cdot \text{s}$  e  $-1,78 \cdot 10^{-7} \text{ kg/m}^3 \cdot \text{s}$  para liberação instantânea (*puff*) e liberação contínua (pluma) respectivamente.

Os dados utilizados para a construção do gráfico do gradiente de concentração média em função da distância para liberação instantânea e contínua estão demonstrados em detalhes também no Apêndice F.

Após as análises para as classes de estabilidade atmosférica instáveis, foi realizada o estudo da concentração média em função da distância percorrida pela nuvem tóxica para a classe de estabilidade atmosférica “D”, neutra, como pode ser observado na Figura 28.

Figura 28 – Comportamento da concentração em função da distância para liberação a 4 metros do nível do solo, considerando a classe de estabilidade “D”



Fonte: Autora

Na Figura 28, é possível atestar que as máximas concentrações médias para as liberações instantânea (*puff*) e contínua (*pluma*) não acontecem na mesma distância a partir da fonte de liberação como foi notado para as classes de estabilidade atmosférica estáveis.

Para liberação instantânea (*puff*), a máxima concentração média foi obtida a 40,0 metros da fonte de liberação e corresponde a  $3 \cdot 10^{-2} \text{ kg/m}^3$ , resultando em uma diminuição de quase 60% em relação à máxima concentração média determinada para a classe de estabilidade atmosférica “C”.

A liberação contínua (*pluma*), no entanto, apresentou o máximo valor de concentração média a 20,0 metros a partir da fonte de liberação, cujo valor corresponde a  $1 \cdot 10^{-4} \text{ kg/m}^3$  e, ao contrário do observado para liberação instantânea (*puff*), apresentou um aumento de mais de 17% na concentração média em relação à classe de estabilidade atmosférica anterior.

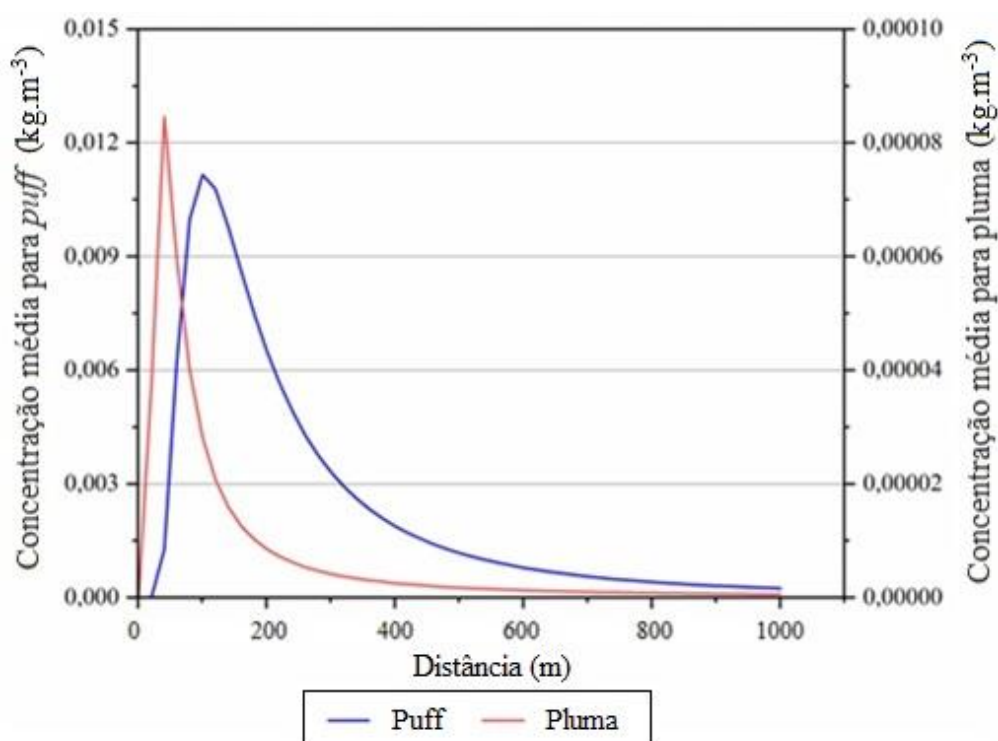
As taxas de decaimento foram estimadas para ambos os tipos de liberação, sendo observado um valor de  $-5,49.10^{-5} \text{ kg/m}^3.\text{s}$  para liberação instantânea (*puff*) e um valor correspondente a  $-2,17.10^{-7} \text{ kg/m}^3.\text{s}$  para liberação contínua (pluma).

No Apêndice F, estão demonstrados os dados utilizados para análise do comportamento da concentração média de cloro em função da distância para a classe de estabilidade atmosférica “D”.

Depois, foi analisado o comportamento da concentração média de cloro em relação à distância percorrida para as classes de estabilidade atmosférica estáveis.

Na Figura 29, é observado o gradiente de concentração média em função da distância percorrida pela nuvem de cloro para classe de estabilidade atmosférica “E”.

Figura 29 – Comportamento da concentração em função da distância para liberação a 4 metros do nível do solo, considerando a classe de estabilidade “E”



Fonte: Autora

Com a Figura 29, é possível observar que as máximas concentrações médias para as liberações instantânea (*puff*) e contínua (pluma) não são obtidas no mesmo ponto, como também foi notado para a classe de estabilidade atmosférica “D”.

A máxima concentração média obtida para liberação instantânea (*puff*) foi de  $1.10^{-2}$  kg/m<sup>3</sup> e está posicionada a uma distância de 100,0 metros da fonte de liberação. Dessa forma, foi observada uma redução a um terço da máxima concentração média em relação à classe de estabilidade anterior.

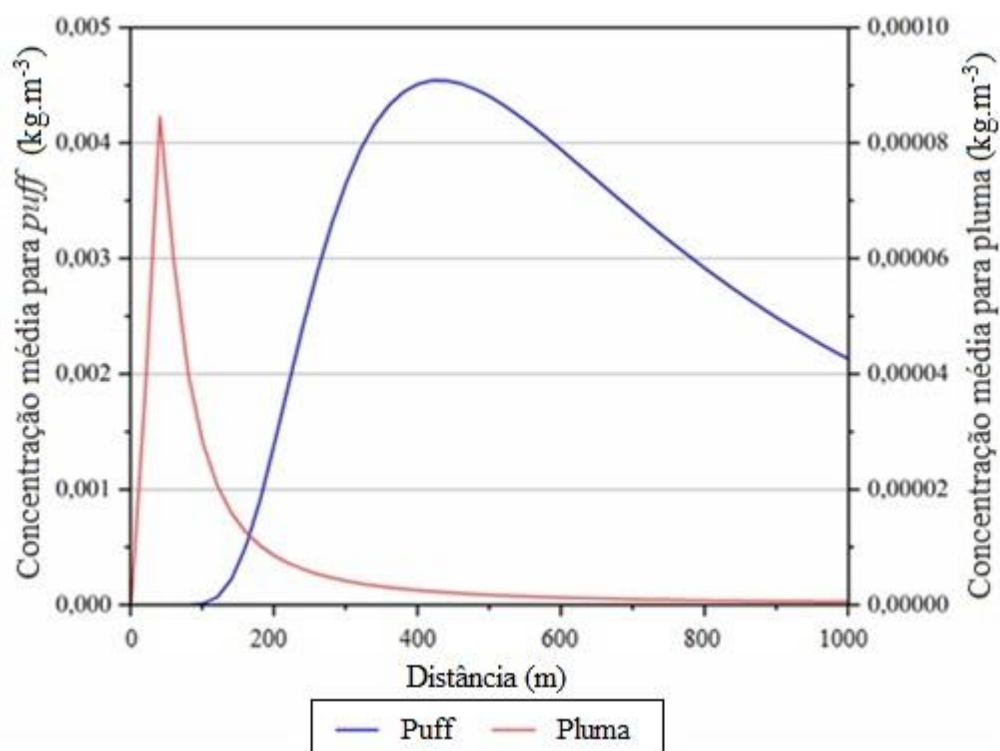
Já para liberação contínua (pluma), a máxima concentração média foi notada a 40,0 metros da fonte de liberação e corresponde a  $8.10^{-5}$  kg/m<sup>3</sup>, portanto, houve também uma redução da máxima concentração média de 20% ao ser comparada à classe de estabilidade atmosférica “D”.

Também foram determinadas as taxas de decaimento para a classe de estabilidade levemente estável, ou seja, “E”. Para liberação instantânea (*puff*) foi notado uma taxa de decaimento de  $-2,42.10^{-5}$  kg/m<sup>3</sup>.s, enquanto que para liberação contínua (pluma) o valor obtido corresponde a  $-1,75.10^{-7}$  kg/m<sup>3</sup>.s.

Os dados utilizados para a construção do gráfico que relaciona concentração média com a distância percorrida pela nuvem tóxica para a classe de estabilidade atmosférica “E” também estão demonstrados no Apêndice F.

Por fim, foram realizadas as análises para obter o comportamento da concentração média de cloro em relação à distância para a classe de estabilidade “F”, classificada como moderadamente estável, como pode ser observado na Figura 30.

Figura 30 – Comportamento da concentração em função da distância para liberação a 4 metros do nível do solo, considerando a classe de estabilidade “F”



Fonte: Autora

A Figura 30 mostra um comportamento distinto do gradiente de concentração média em função da distância para a liberação instantânea (*puff*), de maneira que a máxima concentração média é obtida a 420,0 metros da fonte de liberação e apresenta concentração de  $4.10^{-3} \text{ kg/m}^3$ .

Dessa maneira, quanto mais longe da fonte de liberação estiver a máxima concentração média da substância tóxica, maiores serão as consequências do acidente, devido à proximidade com a população local e a contaminação do meio ambiente.

As condições catastróficas foram observadas para liberação instantânea (*puff*) considerando as classes de estabilidade atmosférica estáveis, por apresentar a máxima concentração média a longas distâncias da fonte de liberação.

Embora as classes de estabilidade atmosférica instáveis apresentem o pico de concentração média posicionados distantes da fonte de liberação, a maior concentração média máxima foi obtida para liberação instantânea (*puff*) considerando a classe de estabilidade atmosférica “D”, neutra.

Já para a liberação contínua (pluma), a maior concentração média máxima foi obtida na classe de estabilidade atmosférica “E”, levemente estável.

Por fim, foi estimada a taxa de decaimento referente a liberação instantânea (*puff*), considerando a classe de estabilidade atmosférica moderadamente estável “F”, cujo valor corresponde a  $-8,32 \cdot 10^{-6} \text{ kg/m}^3 \cdot \text{s}$ .

As taxas de decaimentos determinadas para as liberações instantânea (*puff*) e contínua (pluma) a 4 metros do nível do solo apresentaram valores inferiores quando comparadas às taxas estimadas para liberação ao nível do solo.

Além disso, foi observado um comportamento distinto, de maneira que a taxa de decaimento tende a aumentar conforme o aumento da estabilidade da atmosfera, devido ao aumento da trajetória da nuvem tóxica para atingir o solo, onde são estimados os valores das concentrações médias, resultando na diluição e dispersão da nuvem de cloro.

No Apêndice F, estão demonstrados os dados utilizados na construção dos gráficos do comportamento da concentração média em função da distância para todas as classes de estabilidade atmosférica, considerando as liberações ao nível do solo e a uma altura de referência do mesmo.

### 5.3 ANÁLISE DA ÁREA CONTAMINADA UTILIZANDO AS NUVENS ISOCÊNTRICAS

Em casos de acidentes industriais com liberação de substâncias tóxicas, existe a preocupação em estimar a área afetada e para isso, é construída nuvem isocêntrica e a partir da sua dimensão, comprimento e largura, é possível determinar a região onde a concentração ultrapassa o limite de toxicidade, o que compromete a integridade de trabalhadores e da população.

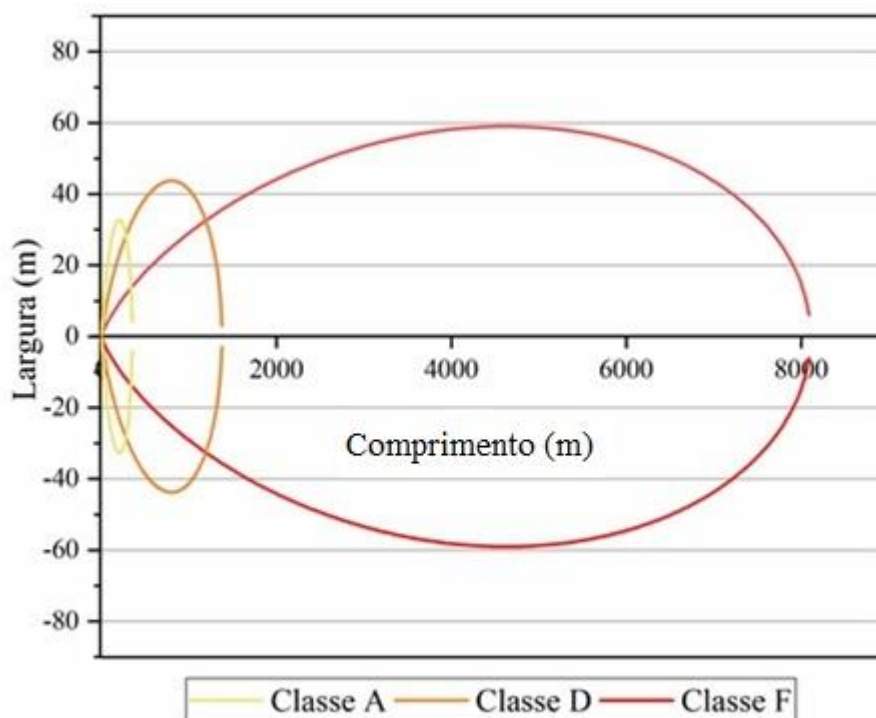
Como mencionado anteriormente, foi adotado como limite de toxicidade o *Emergency Response Planning Guideline*, ERPG-2, por ter sido desenvolvido com a finalidade de proteger a saúde da população e por ser o mais utilizado para planos de emergência. Para o cloro essa concentração corresponde a 3 ppm.

Para a análise da área contaminada, foi utilizado o modelo de dispersão de Pasquill-Gifford e foram mantidos os mesmos parâmetros utilizados para o estudo do comportamento da concentração média em função da distância.

O primeiro estudo foi realizado para liberação instantânea (*puff*) ao nível do solo, no qual foram analisadas as classes de estabilidade atmosférica extremamente instável “A”, neutra “D” e moderadamente estável “F”, como ilustrado na Figura 31.



Figura 31 – Estimativa da área contaminada por meio da nuvem isocêntrica obtida para liberação instantânea ao nível do solo



Fonte: Autora

Ao observar a Figura 31, é possível notar que as nuvens isocêntricas construídas para liberação instantânea (*puff*) apresentam formato circular e, conforme a classe de estabilidade atmosférica se torna estável, aumenta a área contaminada pela liberação tóxica.

A classe de estabilidade atmosférica “A”, foi classificada como zona amarela, uma vez que apresenta a menor área com concentração superior ao limite de toxicidade adotado, ou seja, 3 ppm. Dessa forma, a nuvem isocêntrica apresentou comprimento de 347,8 metros com largura máxima correspondente a 32,7 metros.

A zona intermediária, denominada de zona laranja, corresponde à classe de estabilidade atmosférica “D”, na qual foi possível notar que a nuvem de cloro apresentou comprimento de 1.374,0 metros com largura máxima de 43,7 metros com concentração acima do limite de toxicidade estipulado.

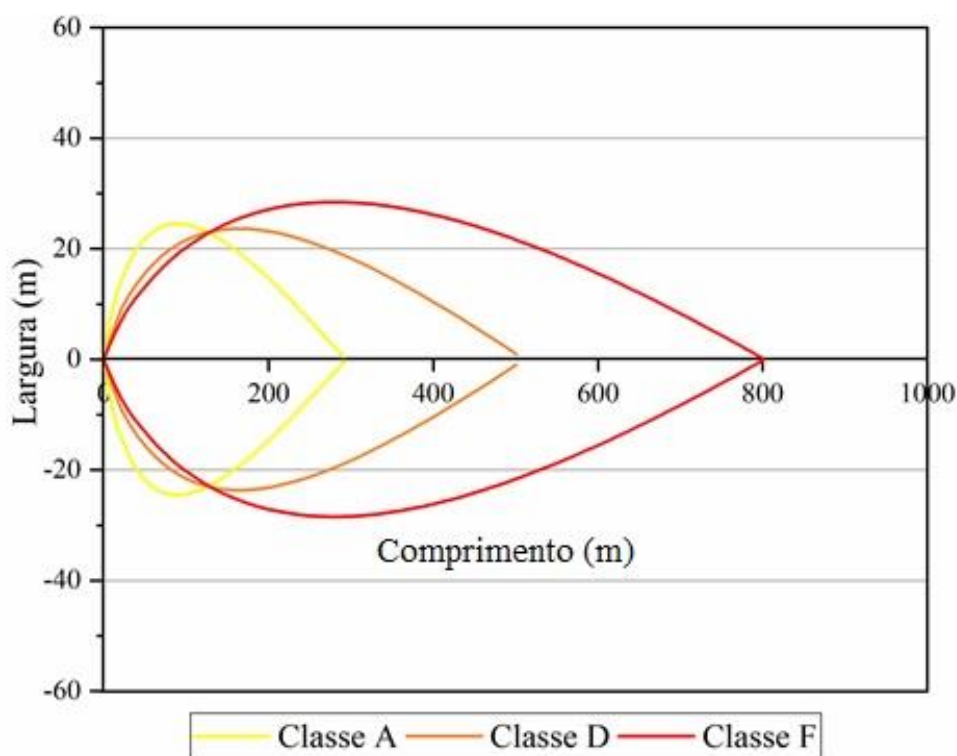
A classe de estabilidade “F” é classificada como moderadamente estável, devido aos baixos movimentos verticais da atmosfera, que são responsáveis pela dispersão da nuvem tóxica. Dessa maneira, é utilizada para estimar a máxima distância atingida para uma liberação acidental, ou seja, *worst case*, sendo denominada de zona vermelha. Esta última corresponde à

maior área contaminada, a qual é definida por um comprimento de 8.088,2 metros e largura de 59,0 metros com concentração superior ao limite de toxicidade adotado.

Os dados utilizados para a construção das nuvens isocêntricas para liberação instantânea ao nível do solo podem ser observados no Apêndice G.

Na sequência, foram construídas as nuvens isocêntricas para liberação contínua (pluma) ao nível do solo, como podem ser observadas na Figura 32.

Figura 32 – Estimativa da área contaminada por meio da nuvem isocêntrica obtida para liberação contínua ao nível do solo



Fonte: Autora

Por meio da Figura 32, é possível observar que as nuvens isocêntricas obtidas para liberação contínua (pluma) apresentam formato achatado, assim como uma menor área contaminada.

A zona amarela, referente à classe de estabilidade atmosférica “A”, apresentou a menor área atingida desse estudo, a qual corresponde a um comprimento de 290,0 metros com largura máxima de 24,5 metros com contração acima do limite de toxicidade estimado, ou seja, ERPG – 2, cuja concentração corresponde a 3 ppm.

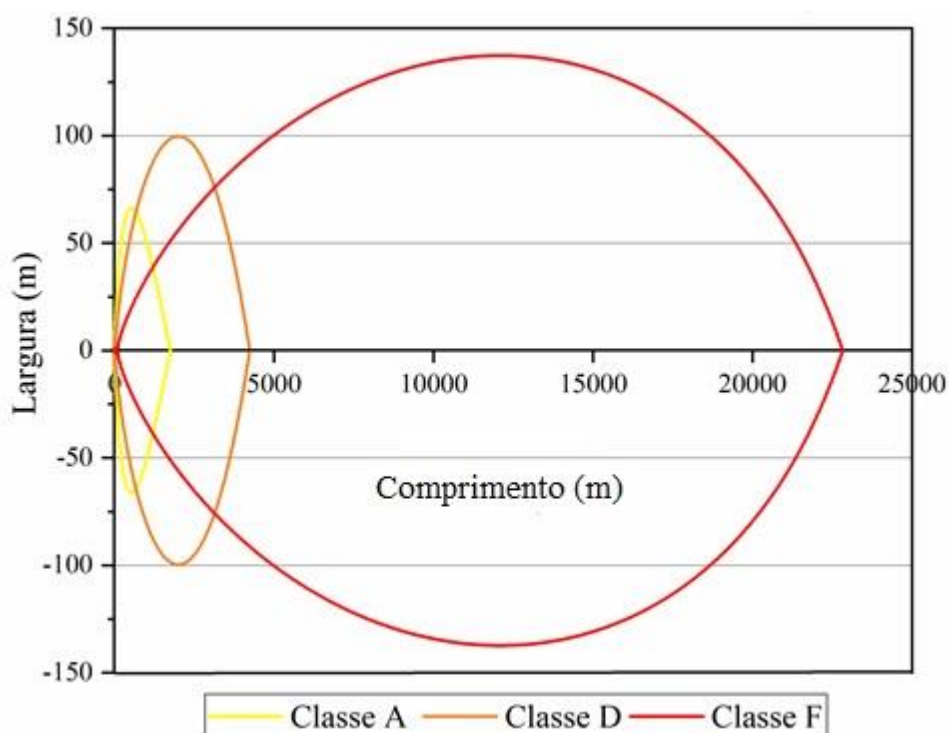
A classe de estabilidade atmosférica “D”, neutra, foi denominada de zona laranja e apresentou uma área contaminada intermediária, correspondente a um comprimento de 500,0 metros e largura de 23,6 metros, com concentração superior a 3ppm.

A maior área contaminada foi obtida para a classe de estabilidade atmosférica “F”, denominada de zona vermelha, em que foram percorridos 800,0 metros a partir da fonte de liberação com largura máxima de 28,4 metros, com concentração acima do limite de toxicidade estipulado.

No Apêndice G, estão demonstrados os dados utilizados para a construção das nuvens isocêntricas a partir de uma liberação contínua ao nível do solo.

Posteriormente, foram analisadas as nuvens isocêntricas construídas para liberações acima do nível do solo. Como já mencionado, o valor de referência foi baseado no sistema de armazenamento de cloro, o qual apresenta altura de até 4 metros.

Figura 33 – Estimativa da área contaminada por meio da nuvem isocêntrica obtida para liberação instantânea a 4 metros do solo



Fonte: Autora

Ao observar a Figura 33, é possível notar que as nuvens isocêntricas obtidas para liberação instantânea (*puff*) a 4 metros do nível do solo também apresentaram formato circular, no entanto, comprometeram maiores áreas quando comparada à liberação ao nível do solo.

A nuvem formada a partir de uma liberação instantânea (*puff*) na atmosfera apresenta inicialmente comportamento de incorporação do ar, promovendo o aumento da circunferência da nuvem e a diluição da mesma. Dessa forma, as nuvens obtidas a partir de liberações instantâneas terão tamanhos superiores às nuvens resultantes de liberações contínuas. Este aumento é maximizado quando a liberação acontece a uma altura de referência do solo, devido ao aumento da trajetória da nuvem para atingir o chão, onde são determinadas as concentrações.

A zona amarela, referente à classe de estabilidade atmosférica “A”, apresentou a menor área contaminada, a qual é delimitada por um comprimento de 1.750,0 metros e largura máxima de 66,3 metros. No entanto, foi observado um aumento dessa área ao comparar com a obtida para liberação ao nível do solo.

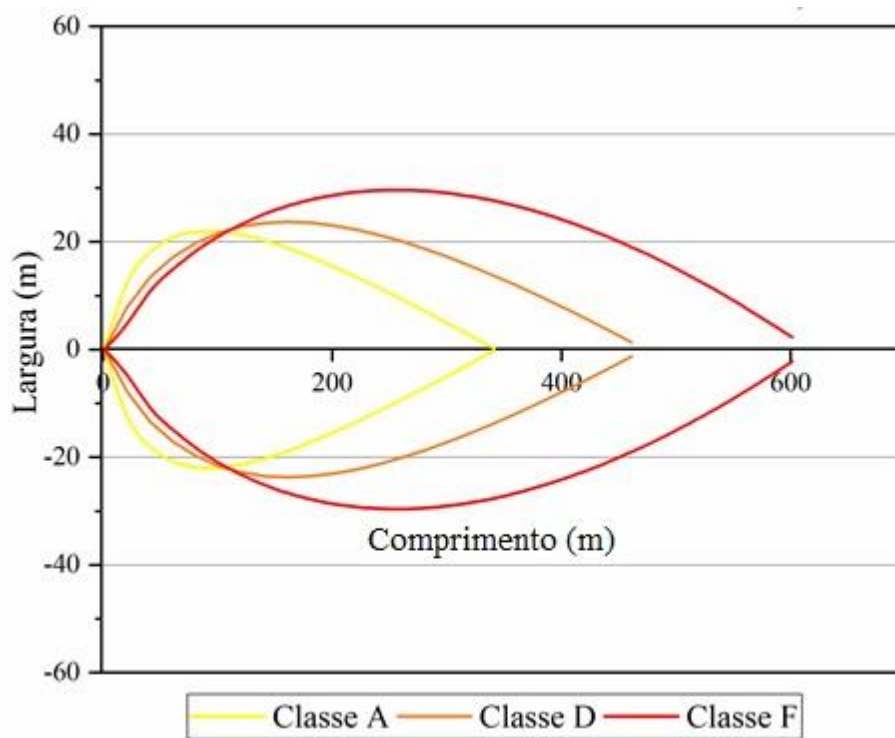
Para a zona laranja, também foi observado um aumento significativo na área contaminada ao ser comparada com a área obtida para liberação ao nível do solo, de maneira que a nuvem tóxica se propaga com concentração superior ao limite de toxicidade até 4.221, 0 metros da fonte de liberação com largura máxima de 99,7 metros.

A classe de estabilidade atmosférica “F” corresponde à zona vermelha, uma vez que apresenta a maior área com concentração superior ao limite de toxicidade adotado de 3 ppm. Desse modo, a área contaminada apresentou comprimento de 22.821,0 metros e largura máxima correspondente a 137,4 metros, sendo a maior área contaminada determinada no presente estudo.

Os dados utilizados para a construção das nuvens isocêntricas a partir da liberação instantânea (*puff*) a 4 metros do nível do solo estão demonstrados em detalhes no Apêndice G.

Por fim, foram realizadas as análises para estimar a área contaminada a partir da liberação contínua a 4 metros do nível do solo. Na Figura 34 é possível observar as nuvens isocêntricas construídas.

Figura 34 – Estimativa da área contaminada por meio da nuvem isocêntrica obtida para liberação contínua a 4 metros do solo



Fonte: Autora

Na Figura 34, é possível observar as nuvens isocêntricas obtidas para liberação contínua a 4 metros do nível do solo apresentaram áreas contaminadas inferiores quando comparadas às áreas obtidas para liberação ao nível do solo.

A nuvem formada a partir de uma liberação contínua (pluma) na atmosfera apresenta dispersão de maneira vertical, que é intensificada conforme a instabilidade da atmosfera. Para liberações a uma altura de referência do solo, esse comportamento é maximizado devido ao aumento da trajetória da nuvem tóxica até o chão, contribuindo para dispersão da nuvem e, consequentemente, a diminuição da área contaminada.

A classe de estabilidade atmosférica “A”, extremamente instável, foi denominada de zona amarela, por apresentar a menor área com concentração superior ao limite de toxicidade estipulado, a qual é delimitada por um comprimento de 341,0 metros e largura máxima de 21,9 metros.

A zona intermediária, denominada de zona laranja, corresponde à classe de estabilidade atmosférica “D”, neutra, na qual foi possível notar que a nuvem de cloro apresentou um

comprimento referente a 461,0 metros com largura máxima de 23,7 metros com concentração acima do limite de toxicidade estipulado.

A classe de estabilidade “F”, moderadamente estável, é denominada de zona vermelha por apresentar a maior área contaminada pela liberação acidental de cloro, sendo definida por um comprimento de 601,0 e por uma largura máxima de 29,6 metros.

No Apêndice G, estão demonstrados em detalhes os dados utilizados para as construções das nuvens isocêntricas.

Na Tabela 33 estão demonstradas as áreas atingidas pela liberação acidental de cloro.

Tabela 33 - Áreas contaminadas conforme a liberação e classe de estabilidade atmosférica

	A	D	F
Liberação instantânea ( <i>puff</i> )			
Liberação ao nível do solo	Comprimento de 347,8 metros Largura de 32,7 metros	Comprimento de 1.374,0 metros Largura de 43,7 metros	Comprimento de 8.088,2 metros Largura de 59,0 metros
Liberação a 4 metros do solo	Comprimento de 1.750,0 metros Largura de 66,3 metros	Comprimento de 4.221,0 metros Largura de 99,7 metros	Comprimento de 22.821,0 metros Largura de 137,4 metros
Liberação contínua ( <i>pluma</i> )			
Liberação ao nível do solo	Comprimento de 290,0 metros Largura de 24,5 metros	Comprimento de 500,0 metros Largura de 23,6 metros	Comprimento de 800,0 metros Largura de 28,4 metros
Liberação a 4 metros do solo	Comprimento de 341,0 metros Largura de 21,9 metros	Comprimento de 461,0 metros Largura de 23,7 metros	Comprimento de 601,0 metros Largura de 29,6 metros

Fonte: Autora

## 5.4 ANÁLISE DA FLUTUABILIDADE DO GÁS

O modelo de dispersão de Pasquill-Gifford é utilizado para analisar o comportamento de gases com fluatibilidade neutra e se baseia na estimativa da concentração média, considerando os movimentos turbulentos. É utilizado para uma primeira análise e apresenta bons resultados para dispersão de gases densos.

No entanto, para planos de emergência, é preciso determinar as concentrações instantâneas, as quais são superiores as concentrações médias e levam em consideração as propriedades físico-químicas do gás.

Um exemplo de modelo utilizado para essa finalidade, é o modelo de Britter e McQuaid, o qual é empregado para analisar a dispersão de gases com densidade superior a densidade do ar, levando em consideração as liberações instantânea (*puff*) e contínua (pluma) ao nível do solo.

Esse modelo estima a distância atingida pela nuvem tóxica para uma determinada concentração, por meio da correlação entre esta concentração ( $C_m$ ) e a concentração na fonte de liberação ( $C_0$ ).

A concentração de referência estipulada para esse estudo corresponde ao limite de toxicidade adotado que, como já mencionado, equivale ao ERPG-2 e cujo valor é de 3 ppm para o cloro.

No entanto, a relação entre a concentração do limite de toxicidade ( $C_m$ ) e a concentração na fonte de liberação ( $C_0$ ), também conhecida por taxa de concentração, apresentou um valor muito pequeno e extrapolou os limites do gráfico de correlação de gás denso proposto por Britter e McQuaid.

Isto demonstra que, na distância necessária para a nuvem tóxica atingir a concentração referente ao limite de toxicidade, a fluatibilidade não apresenta características de gás denso e, por isso, o modelo de Britter e McQuaid é aplicado até a distância de transição.

Portanto, foi estimado o ponto de transição da fluatibilidade da nuvem ( $x_t$ ), o qual corresponde à distância a partir da qual a nuvem tóxica de cloro deixa de apresentar características de gás denso e passa a se comportar como gás neutro.

A análise referente à liberação instantânea (*puff*) apresentou como resultado um ponto de transição ( $x_t$ ) de 88,5 metros a partir da fonte de liberação. Por outro lado, para a análise da liberação contínua (pluma), a distância obtida foi inferior, sendo o ponto de transição ( $x_t$ ) obtido a 2,1 metros em relação a fonte.

Em seguida, foram realizadas as análises para nuvem de fluutuabilidade neutra, as quais se basearam no modelo de dispersão de Pasquill-Gifford, sendo possível estimar a distância virtual ( $x_v$ ), que corresponde ao ponto no qual a concentração de fluutuabilidade neutra é igual à concentração de gás denso, a distância a partir da qual a nuvem atinge o limite de toxicidade adotado ( $x_{nb}$ ) e a máxima distância atingida pela nuvem ( $x$ ).

Para a liberação instantânea (*puff*), a distância virtual ( $x_v$ ) foi obtida a 115,6 metros a partir da fonte de liberação, ou seja, um valor superior ao ponto de transição determinado ( $x_t$ ), o que pode ser justificado pela pequena diferença entre esses dois pontos, de maneira que a mudança da fluutuabilidade da nuvem tóxica acontece no exato momento em que a nuvem atinge a concentração de transição, ou seja, a distância virtual.

Além disso, a nuvem tóxica precisou percorrer 3.245,7 metros para apresentar concentração referente ao limite de toxicidade empregado no estudo, ou seja, 3 ppm, sendo essa a máxima distância atingida pela nuvem de cloro.

Já para a análise da liberação contínua (*pluma*), a distância virtual ( $x_v$ ) estava posicionada a 0,8 metros da fonte de liberação, além disso, a nuvem tóxica precisou se deslocar por 78,5 metros da fonte de liberação para demonstrar a concentração correspondente ao limite de toxicidade adotado, sendo a máxima distância atingida pela nuvem tóxica de cloro com essa concentração referente a 79,7 metros.

Dessa maneira, foi possível notar que os pontos de transição ( $x_t$ ) determinados para ambos os tipos de liberação estavam situados próximos à fonte de liberação, sendo possível afirmar que a nuvem tóxica apresentou comportamento predominantemente neutro e, portanto, o modelo de dispersão de Pasquill-Gifford apresentou resultados satisfatórios para o estudo de caso proposto.



## 6 CONCLUSÃO

A análise de riscos é realizada em plantas químicas e petroquímicas com a finalidade de identificar e mensurar possíveis acidentes e, para isso, são utilizados alguns modelos matemáticos que auxiliam na quantificação das consequências dos acidentes. Esses modelos são aplicados nas indústrias por meio de *softwares* comerciais, que requerem alto investimento e profissionais capacitados, ou *freewares*, que necessitam de poucos dados de entrada obtendo resultados simplificados.

Devido à importância da análise de riscos, foram implementados dois modelos de dispersão na ferramenta *Aspen Custom Modeler* (ACM), do *software* ASPEN Plus®, que já é empregado em plantas químicas para o estudo de processos. Dessa forma, foi agregado ao *software* nova aplicabilidade sem a necessidade de realizar qualquer investimento.

O modelo de dispersão de Pasquill-Gifford foi utilizado para analisar nuvens tóxicas de fluabilidade neutra, enquanto o modelo de dispersão de Britter e McQuaid é aplicado para analisar o comportamento de substâncias densas na atmosfera.

O modelo de dispersão de Pasquill-Gifford implementado ao ACM foi validado com base nos resultados provenientes de *softwares* comerciais e *freewares*. Esses dados foram retirados do artigo *Comparison of Six Widely – Used Dense Gas Dispersion Models for Three Recent Chlorine Railcar Accidents*, dos autores Hanna et al., no qual foram analisados seis *softwares* de análises de riscos distintos.

Dessa maneira, foram obtidos resultados coerentes e satisfatórios, o que demonstra a aplicabilidade da ferramenta ACM para a realização de análise de riscos, sendo possível realizar análises da dispersão de nuvens tóxicas na atmosfera, como a obtenção do comportamento da concentração média ao longo da distância e a estimativa da área contaminada pela liberação acidental de cloro por meio das nuvens isocêntricas.

As análises da concentração média em função da distância percorrida pela nuvem tóxica foram realizadas sendo observados valores de concentrações médias consideravelmente maiores para as liberações instantâneas (*puff*) quando comparadas às liberações contínuas (*pluma*), devido às características distintas apresentadas por elas. A liberação instantânea emite uma quantidade de substância tóxica na atmosfera de maneira imediata e a contínua emite de maneira ponderada, em um intervalo de tempo.

Além disso, foram analisadas as concentrações médias para as classes de estabilidade atmosférica propostas por Pasquill-Gifford, de maneira que foi observado um aumento da

concentração média conforme o aumento da estabilidade atmosférica para ambos os tipos de liberação ao nível do solo.

O valor da concentração média ao longo da distância percorrida pela nuvem tóxica, levando em consideração também a liberação ao nível do solo, apresentou uma redução exponencial conforme o deslocamento da nuvem de cloro para longe da fonte de liberação.

Outro fator que influencia a dispersão da nuvem tóxica é a altura na qual ocorre a liberação acidental da substância, uma vez que promove o aumento da trajetória da nuvem tóxica até o chão, promovendo a dispersão da mesma e, conseqüentemente, a redução da concentração média.

Para as liberações que ocorreram a 4 metros do nível do solo, foram observadas uma redução da concentração média quando comparadas às concentrações médias obtidas ao nível do solo, para ambos os tipos de liberação. Além disso, houve alterações no comportamento da concentração média em função da distância percorrida pela nuvem tóxica, em que a menor concentração média foi notada próximo ao ponto de liberação. Em seguida, a concentração média aumentou, sendo observada a máxima concentração e, posteriormente, ocorreu a redução da mesma, promovida pela diluição e dispersão da nuvem tóxica.

A liberação instantânea (*puff*) apresentou os picos de concentração média mais distantes da fonte de liberação, requerendo maior cuidado em situações reais, pois, quanto maior a distância necessária para atingir a concentração máxima, maior serão as conseqüências do acidente, devido à proximidade com a população local.

Ao analisar as taxas de decaimento estimadas para as liberações instantânea (*puff*) e contínua (pluma) ao nível do solo, foi observado que com o aumento da estabilidade atmosférica, ocorre uma redução da taxa de decaimento, provocado pela baixa turbulência mecânica atmosférica que diminui os movimentos verticais do ar.

No entanto, para as liberações a uma certa altura de referência do solo, as taxas de decaimento apresentam valores inferiores aos observados para liberações ao nível do solo. Além disso, é notado um comportamento distinto, de forma que a taxa de decaimento tende a aumentar conforme o aumento da estabilidade da atmosfera, provocado pelo aumento da trajetória da nuvem tóxica para atingir o solo, resultando na diluição e dispersão da nuvem de cloro.

As nuvens isocêntricas foram construídas com o intuito de mensurar a área contaminada pela liberação acidental de cloro, sendo as nuvens isocêntricas resultantes da liberação instantânea (*puff*) circulares, entretanto, as nuvens obtidas para liberação contínua (pluma) demonstraram formato distinto, sendo notado um comportamento achatado.

Para as análises, foram consideradas as classes de estabilidade atmosférica instável, neutra e estável, sendo observado um aumento da área atingida conforme o aumento da estabilidade da atmosfera.

Para liberação instantânea (*puff*) foi notado um aumento da área contaminada conforme o aumento da altura da liberação da substância tóxica, uma vez que a nuvem produzida a partir de uma liberação instantânea apresenta a incorporação de ar ao entrar em contato com a atmosfera, proporcionando a diluição do *puff* e o aumento das dimensões da nuvem até atingir sua capacidade máxima. Posteriormente, a nuvem passa a sofrer os efeitos da atmosfera, dando início à sua dispersão.

Dessa maneira, a maior área contaminada foi obtida para liberação instantânea (*puff*) a 4 metros do nível do solo, levando em consideração a classe de estabilidade atmosférica “F”, onde a nuvem tóxica apresentou comprimento referente a 22.821,0 metros e largura máxima de 137,4 metros.

Já para liberação contínua (pluma), foi notado o comportamento contrário, sendo observado a redução da área contaminada para as liberações a 4 metros do nível do solo, por causa da dispersão de maneira vertical apresentada pela pluma. Ou seja, quando a nuvem entra em contato com o ar atmosférico, ela passa a apresentar movimentos verticais com o intuito de intensificar sua dispersão.

Portanto, a menor área atingida pela liberação acidental de cloro foi determinada para liberação contínua (pluma) ao nível do solo, considerando a classe de estabilidade atmosférica “A”, na qual foi obtida uma nuvem tóxica de 290,0 metros de comprimento e cuja largura máxima corresponde a 24,5 metros.

Por fim, foram realizadas as análises de dispersão de gás denso por meio da implementação do modelo de dispersão de Britter e McQuaid na ferramenta ACM, através da qual foi possível estimar a distância atingida pela nuvem tóxica. Esta correlaciona o ponto de transição da flutuabilidade da nuvem ( $x_t$ ), a distância virtual ( $x_v$ ) e a distância na qual a nuvem tóxica atinge a concentração referente ao limite de toxicidade ( $x_{nb}$ ).

Para liberação instantânea (*puff*), a mudança da flutuabilidade da nuvem tóxica ocorreu a 88,5 metros da fonte de liberação e a máxima distância atingida pela nuvem de cloro com concentração superior ao limite de toxicidade foi observado a 3.245,7 metros em relação ao ponto de liberação.

Já para a liberação contínua (pluma), o ponto de transição foi localizado a 2,1 metros a partir da fonte de liberação e a máxima distância atingida pela nuvem tóxica com concentração excedente ao limite de toxicidade foi observado a 79,7 metros da fonte de liberação.

Os pontos de transição da flutuabilidade da nuvem obtidos para ambos os tipos de liberação foram muito próximos à fonte de liberação, o que demonstra o comportamento predominantemente neutro da flutuabilidade. Dessa forma, o modelo de dispersão de Pasquill-Gifford apresenta boa correlação de resultados para o estudo de caso proposto, embora o cloro seja um gás denso.

A partir dos resultados obtidos é válido afirmar que os modelos de dispersão implementados na ferramenta ACM do *software* ASPEN Plus® pode ser utilizado como alternativa para realização de análise de riscos.

## REFERÊNCIAS

- ABC. **Histórico**. 2018. Disponível em : <http://www.abc.com.py/nacionales/fuga-de-cloro-en-carmen-del-parana-1685489.html>. Acesso em: 25 abr. 2018.
- ALE, B. J. M.; UIJT DE HAAG, P. A. M. **Guidelines for quantitative risk assessment**. 3rd ed. Holanda: VROM, 2005.
- ANUÁRIO da indústria química brasileira. São Paulo: ABIQUIM, 2015. 208 p.
- ANSYS. **Who we are**. 2019. Disponível em: <https://www.ansys.com/about-ansys>. Acesso em: 23 fev. 2019.
- BRITTER, R. E. Atmospheric dispersion of dense gases. **Annual Review of Fluid Mechanics**, v. 21, p.317-344, 1989. Disponível em: [https://www.researchgate.net/publication/234150999\\_Atmospheric\\_Dispersion\\_of\\_Dense\\_Gases](https://www.researchgate.net/publication/234150999_Atmospheric_Dispersion_of_Dense_Gases). Acesso em: 26 mar. 2019.
- BRITTER, R. E.; MCQUAID, J. **Workbook on the Dispersion of Dense Gases**. Sheffield, United Kingdom: Health and Safety Executive, 1988.
- COMPANHIA AMBIENTAL DO ESTADO DE SÃO PAULO. **Análise de Risco Tecnológico – Grandes acidentes - Bhopal**, São Paulo, 2018. Disponível em: <https://cetesb.sp.gov.br/analise-risco-tecnologico/grandes-acidentes/bhopal/>. Acesso em: 13 mar. 2018a.
- COMPANHIA AMBIENTAL DO ESTADO DE SÃO PAULO. **Análise de risco tecnológico – grandes acidentes – Seveso**, São Paulo, 2018. Disponível em: <https://cetesb.sp.gov.br/analise-risco-tecnologico/grandes-acidentes/seveso/>. Acesso em: 13 mar. 2018b.
- COMPANHIA AMBIENTAL DO ESTADO DE SÃO PAULO. **Análise de risco tecnológico – grandes acidentes – Vila Socó**, São Paulo, 2018. Disponível em: <https://cetesb.sp.gov.br/analise-risco-tecnologico/grandes-acidentes/vila-soco-cubatao/>. Acesso em: 13 mar. 2018c.
- COMPANHIA AMBIENTAL DO ESTADO DE SÃO PAULO. **Análise de risco tecnológico – grandes acidentes – Flixborough**, São Paulo, 2018. Disponível em: <https://cetesb.sp.gov.br/analise-risco-tecnologico/grandes-acidentes/flixborough/>. Acesso em: 13 mar. 2018d.
- COMPANHIA AMBIENTAL DO ESTADO DE SÃO PAULO. **Norma P4.261 – Risco de acidente de origem tecnológica: Método para decisão e termos de referência**, São Paulo, 2011. Disponível em: <http://www.cetesb.sp.gov.br/>. Acesso em: 12 mar. 2011.
- CROWL, A. D et al. Process Safety. In: GREEN, Don W.; PERRY, Robert H. (Ed.). **Perry's chemical engineers' handbook**. 8th ed. New York: McGraw-Hill, 2008.
- CROWL, Daniel A.; LOUVAR, Joseph F. **Chemical process safety fundamentals with applications**. 2nd ed. New Jersey: Prentice-Hall, 2002. 625 p.

CROWL, Daniel A.; LOUVAR, Joseph F. **Chemical process safety fundamentals with applications**. 3rd ed. New Jersey: Prentice-Hall, 2011. 722 p.

DUNNING, A. E.; OSWALT, J. L. Train Wreck and Chlorine Spill in Graniteville, South Carolina. **Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board**, v. 2009, n. 1, p.130-135, 2007. Disponível em: [https://www.researchgate.net/publication/245562829\\_Train\\_Wreck\\_and\\_Chlorine\\_Spill\\_in\\_Graniteville\\_South\\_Carolina\\_Transportation\\_Effects\\_and\\_Lessons\\_in\\_Small-Town\\_Capacity\\_for\\_No-Notice\\_Evacuation](https://www.researchgate.net/publication/245562829_Train_Wreck_and_Chlorine_Spill_in_Graniteville_South_Carolina_Transportation_Effects_and_Lessons_in_Small-Town_Capacity_for_No-Notice_Evacuation). Acesso em: 25 abr. 2018.

EXAME. **Histórico**. 2011. Disponível em: <https://exame.abril.com.br/mundo/vazamento-de-cloro-em-fabrica-da-braskem-intoxica-30-em-alagoas/>. Acesso em: 27 mar. 2018.

GHEORGHE, A. V.; NICOLET-MONNIER, M. Modeling of Dense Gas Dispersion. **Environmental Science And Technology Library**, p.193-303, 1995. Springer Netherlands. Disponível em: [https://www.researchgate.net/publication/299711950\\_Modeling\\_of\\_Dense\\_Gas\\_Dispersion](https://www.researchgate.net/publication/299711950_Modeling_of_Dense_Gas_Dispersion). Acesso em 05 abr. 2019.

GUARNACCIA, J.; HOPPE, T. Off-site toxic consequence assessment: A simplified modeling procedure and case study. **Journal of Hazardous Materials**, v. 159, n. 1, p.177-184, 2008. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0304389407014215>. Acesso em: 02 out. 2017.

HANNA, S. et al. Comparison of six widely-used dense gas dispersion models for three recent chlorine railcar accidents. **Process Safety Progress**, v. 27, n. 3, p.248-259, 2008. Disponível em: [https://www.researchgate.net/publication/230009677\\_Comparison\\_of\\_Six\\_Widely-Used\\_Dense\\_gas\\_dispersion\\_models\\_for\\_three\\_recent\\_chlorine\\_railcar\\_accidents](https://www.researchgate.net/publication/230009677_Comparison_of_Six_Widely-Used_Dense_gas_dispersion_models_for_three_recent_chlorine_railcar_accidents). Acesso em: 26 abr. 2018.

LEES, P. F. **Loss prevention in the process industries: Hazard Identification, Assessment and Control**. Second Edition. Loughboroug Universiy, United Kingdom: Butterworth Heinemann, 1996.

MARKIEWICZ, M.T., Mathematical modelling of the heavy gas dispersion. In: MANHAZ Monograph, **Models and techniques for health and environmental hazard assessment and management. Part 2**. Air quality modelling. Institute of Atomic Energy, Otwock-Swierk, 2006, 279-302, 1. Disponível em: [https://www.researchgate.net/publication/301890610\\_Mathematical\\_modeling\\_of\\_the\\_heavy\\_gas\\_dispersion](https://www.researchgate.net/publication/301890610_Mathematical_modeling_of_the_heavy_gas_dispersion). Acesso em: 25 mar. 2019.

MARKIEWICZ, M. A Review of Mathematical Models for the Atmospheric Dispersion of Heavy Gases. Part I. A Classification of Models. **Ecological Chemistry and Engineering S**, v. 19, n. 3, p.297-314, 2012. Disponível em: [https://www.researchgate.net/publication/271314675\\_A\\_Review\\_of\\_Mathematical\\_Models\\_f\\_or\\_the\\_Atmospheric\\_Dispersion\\_of\\_Heavy\\_Gases\\_Part\\_I\\_A\\_Classification\\_of\\_Models](https://www.researchgate.net/publication/271314675_A_Review_of_Mathematical_Models_f_or_the_Atmospheric_Dispersion_of_Heavy_Gases_Part_I_A_Classification_of_Models). Acesso em: 15 mar. 2019.

MARKIEWICZ, M. T. A review of models for the atmospheric dispersion of heavy gases. part ii. model quality evaluation. **Ecological Chemistry and Engineering S**, v. 20, n. 4, p.763-782, 2013. Disponível em: [https://www.researchgate.net/profile/Maria\\_Markiewicz/publication/272536381\\_A\\_review\\_of\\_models\\_for\\_the\\_atmospheric\\_dispersion\\_of\\_heavy\\_gases\\_Part\\_II\\_Model\\_quality\\_evaluation/links/56a77d8f08aeded22e36d7b6/A-review-of-models-for-the-atmospheric-dispersion-of-heavy-gases-Part-II-Model-quality-evaluation.pdf](https://www.researchgate.net/profile/Maria_Markiewicz/publication/272536381_A_review_of_models_for_the_atmospheric_dispersion_of_heavy_gases_Part_II_Model_quality_evaluation/links/56a77d8f08aeded22e36d7b6/A-review-of-models-for-the-atmospheric-dispersion-of-heavy-gases-Part-II-Model-quality-evaluation.pdf). Acesso em: 15 mar. 2019.

MOURA, L. A. A. de **Qualidade e Gestão Ambiental**. 4. ed. São Paulo: Juarez de Oliveira, 2004.

MURRAY, F. E. Guidelines for use of vapour cloud dispersion models by Hanna, S. R. and Drivas, P. J. 1987, 177 pages, A.I.Ch.E. New York, New York. **The Canadian Journal Of Chemical Engineering**, v. 66, n. 1, p.173-173, fev. 1988. Disponível em: [https://www.researchgate.net/publication/285752621\\_Guidelines\\_for\\_the\\_Use\\_of\\_Vapour\\_Cloud\\_Dispersion\\_Models](https://www.researchgate.net/publication/285752621_Guidelines_for_the_Use_of_Vapour_Cloud_Dispersion_Models). Acesso em: 15 mar. 2019.

PASQUILL, F. The estimation of the dispersion of windborne material, **Meteorological Magazine**, 90: 33-49, 1961. Disponível em: <https://webcache.googleusercontent.com/search?q=cache:Dqg0bPBjL5EJ:https://digital.nmla.metoffice.gov.uk/download/file/sdb%253AdigitalFile%257Cd75249c9-59ed-41cd-9eb0-1ba3176e7b36/+&cd=4&hl=pt-BR&ct=clnk&gl=br>. Acesso em: 05 abr. 2019.

PAUL, R.; MONDAL, A.; SHOUKAT CHOUDHURY, M. A. A. Dispersion Modeling of Accidental Release of Chlorine Gas. **Proceeding of the International Conference on Chemical Engineering**. p. 213 - 217, dec. 2014. Disponível em: [https://www.researchgate.net/publication/319114497\\_Dispersion\\_Modeling\\_of\\_Accidental\\_Release\\_of\\_Chlorine\\_Gas](https://www.researchgate.net/publication/319114497_Dispersion_Modeling_of_Accidental_Release_of_Chlorine_Gas). Acesso em: 05 abr. 2019.

PINTARIČ, Z. N. Assessment of the Consequences of Accident Scenarios Involving Dangerous Substances. **Process Safety and Environmental Protection**, v. 85, n. 1, p.23-38, jan. 2007. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0957582007713836>. Acesso em: 02 jul. 2017.

PINTO J. D. **Análise Quantitativa de riscos em uma planta de produção de metanol**. 2013. 135 f. Dissertação (Mestrado em Tecnologia de Processos Químicos e Tecnológicos) – Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2013. Disponível em: <https://pt.scribd.com/document/257431313/Analise-Quantitativa-de-Riscos-Em-Uma-Planta-de-Producao-de-Metanol>. Acesso em: 06 abr. 2019.

PONTIGGIA, M. et al. Hazardous gas releases in urban areas: Assessment of consequences through CFD modelling. **Journal of Hazardous Materials**, v. 176, n. 1-3, p.589-596, 2010. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0304389409018688>. Acesso em: 03 maio 2017.

ROBERTS, O. F. T.. The Theoretical Scattering of Smoke in a Turbulent Atmosphere. **Proceedings Of The Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences**, v. 104, n. 728, p.640-654, 1 dez. 1923.

SAFER TRACE. **Smarter Compliance**. Disponível em: <https://www.safersystem.com/products/safer-trace/>. Acesso em: 25 fev. 2019.

SALAZAR, M. P. **Estudo sobre a modelagem da dispersão atmosférica de gases densos decorrentes de liberações acidentais em análise quantitativa de riscos**. 2016. 97 p. Dissertação (Mestrado) – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. Departamento de Engenharia Naval e Oceânica, São Paulo, 2016.

SCHMITTINGER, P. Chlorine. In: ULLMANN'S encyclopedia of industrial chemistry. 7th ed. completely rev. Weinheim: VCH, c2011. 40 v. v. 8.

SCHMITTINGER, P. **Chlorine: principles and industrial practice**. 1st ed. Weinheim: VCH, 2000.

SENNE JUNIOR, M. **Abordagem sistemática para avaliação de riscos de acidentes em instalações de processamento químicos e nuclear**. 2003. 214 p. Tese (Doutorado na Área de Concentração Sistema de Processos Químicos e Informática) – Universidade Estadual de Campinas UNICAMP, Campinas, 2003. Disponível em: <https://indicadoresdeemprego.files.wordpress.com/2013/12/abordagem-sistemica-para-avaliac3a7c3a3o-de-riscos-de-acidentes-em-instalac3a7c3b5es-de-processamento-quimico-e-nuclear.pdf>. Acesso em: 06 abr. 2019.

SOUZA, E. A. **O treinamento industrial e a gerência de riscos: uma proposta de instrução programada**. 1995. 94 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Produção) - Escola de Engenharia de Produção e Sistemas, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 1995.

SUTTON, O. G. **Micrometeorology**. New York: McGraw-Hill, 1953.

UNITED STATES ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY. Risk management program guidance for offsite consequence analysis. Disponível em: <https://www.epa.gov/sites/production/files/2013-11/documents/oca-chps.pdf>. Acesso em: 05 abr. 2019.

UOL. **Histórico**. 2018. <https://noticias.uol.com.br/ultimas-noticias/efe/2018/03/20/vazamento-de-cloro-no-paraguai-deixa-1-morto-e-forca-evacuacao-de-800-pessoas.htm>. Acesso em: 25 abr. 2018.

UOL. **Histórico**. 2011. <https://economia.uol.com.br/ultimas-noticias/valor/2011/05/31/braskem-conclui-analise-das-causas-do-vazamento-de-cloro-em-al.jhtm>>. Acesso em 03 de abril de 2018.

VAN ULDEN, A.P. **On the spreading of a heavy gas released near the ground**. In Buchmann CH, editors. Loss prevention and safety promotion in process industries. The Netherlands: Elsevier, 1974.

VERSTEEG, H. K.; MALALASEKERA, W. **An Introduction to Computational Fluid Dynamics: The finite volume method**. 1st ed. New York, United States: Longman Scientific & Technical, 1995.



WITLOX, H. W. M.; MCFARLANE, K. Interfacing dispersion models in the HGSYSTEM hazard-assessment package. **Atmospheric Environment**, v. 28, n. 18, p.2947-2962, 1994. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/1352231094903425>. Acesso em: 30 jan. 2019.

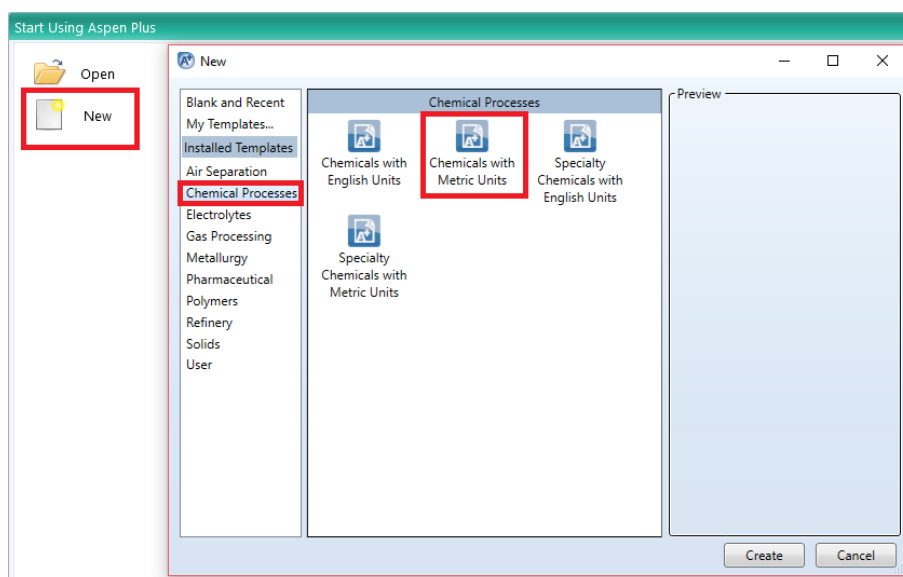
ZOLER, L., ESPING, J. P. Use ‘What if’ method for process hazard analysis. **Hydrocarbon Process**, p. 132B – 132 G, 1993.

## **APÊNDICE A – Implementação do modelo de dispersão para liberação instantânea**

Para a construção dos modelos de dispersão no *Aspen Custom Modeler* (ACM), foi necessário a criação de um arquivo no *software* ASPEN Plus® com as substâncias em análise, com a finalidade de obter as propriedades físico-químicas das mesmas.

Para isso, ao abrir o *software* ASPEN Plus®, foi selecionado a opção “New” com o objetivo de criar um arquivo, e com isso, foi aberta a janela que consta as opções de simulação possíveis. Foi selecionada a opção “Chemical Process”, utilizando unidades métricas. Na Figura 35 é indicada a sequência de opções selecionadas.

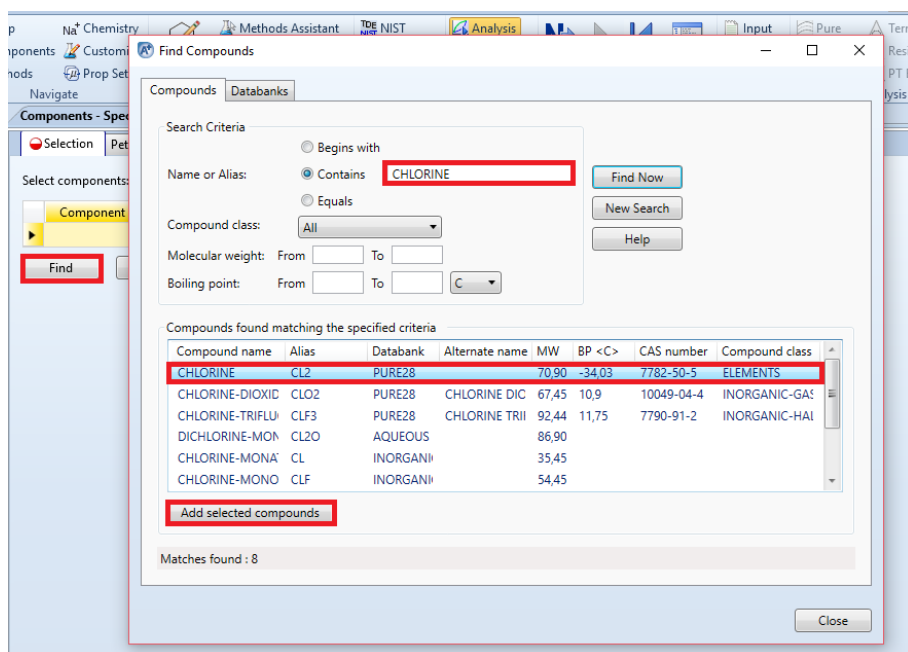
Figura 35 – Criação de um arquivo no *software* ASPEN Plus®



Fonte: Autora

Em seguida, houve um redirecionamento para uma nova página do *software*, na qual foi possível selecionar os componentes químicos de interesse, cloro, água, oxigênio e nitrogênio. Para criar a lista com os componentes, foi selecionada a opção “Find”, que possibilitou escrever o nome dos componentes e adicioná-los as especificações. Esse processo foi repetido até que todas as substâncias fossem inseridas. Esse procedimento pode ser observado na Figura 36.

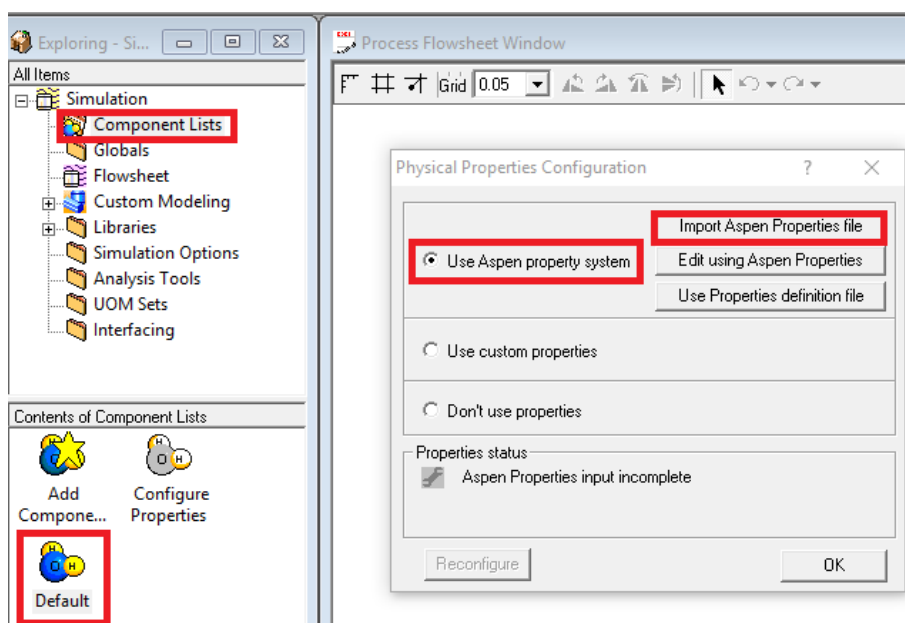
Figura 36 – Criação da lista de componentes presentes no cenário acidental



Fonte: Autora

Para dar início à construção do modelo matemático de dispersão no *software* ACM, foram importadas as propriedades físico-químicas das substâncias, sendo selecionada a opção “*Component Lists*” e, na sequência, “*Default*”, o que possibilitou vincular o arquivo do *software* ASPEN Plus® ao ACM, através da opção “*Import Aspen Properties File*”, como pode ser observado na Figura 37.

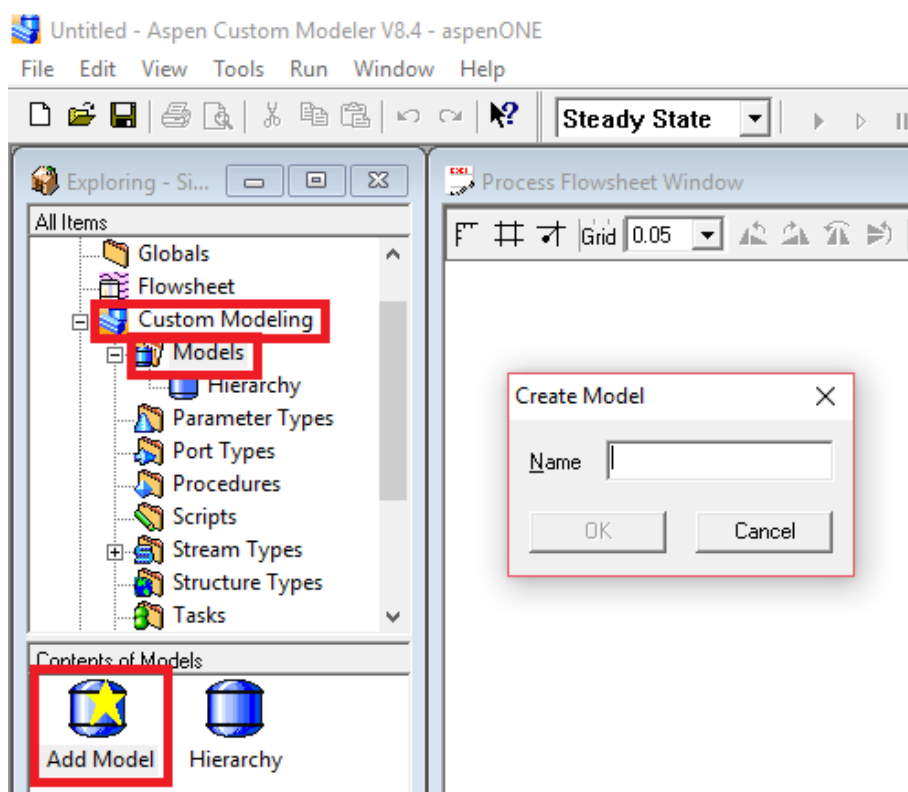
Figura 37 – Sincronização do arquivo do *software* ASPEN Plus® à ferramenta ACM



Fonte: Autora

Após a vinculação do arquivo referente às propriedades físico-químicas com o ACM, foi possível construir o modelo matemático de dispersão para a liberação instantânea (*puff*) ao nível do solo. Para tal, foi aberta a aba “*Custom Modeling*” e selecionada a opção “*Models*”, o que permitiu a criação de um novo modelo. Esse procedimento pode ser observado na Figura 38.

Figura 38 – Criação do modelo de dispersão para liberação instantânea (*puff*)



Fonte: Autora

Com a criação do novo modelo, foi aberta uma nova janela, permitindo o desenvolvimento do mesmo, o qual foi baseado na declaração de variáveis, declaração de parâmetros e equacionamentos, como pode ser observado na Figura 39.

Figura 39 – Implementação do modelo de dispersão no ACM para liberação instantânea

```

1  == Model Puff_ao_nivel_do_solo
2
3
4  // PROGRAMAÇÃO PARA TODAS AS CLASSES DE ESTABILIDADE ATMOSFÉRICA
5  // Definição de massa
6  Qm as mass;
7  // Definição de velocidade
8  u as velocity;
9  // Definição de tempo
10 t as time_;
11 // Definição de distância
12 x as length;
13 // Definição de concentração
14 Conc as conc_mass;
15 // Definição de sigma_x
16 sigma_x as notype;
17 // Definição de sigma_y
18 sigma_y as notype;
19 // Definição de sigma_z
20 sigma_z as notype;
21 // pi será nomeado de constante, k
22 // Definição de k
23 k as RealParameter (7.8748);
24 // Determinação dos coeficientes de dispersão para as diversas classes de estabilidade atmosférica
25 CaseUses AS Case ("A");
26 == | if CaseUses == "A" then
27   sigma_x = 0.18*x^0.92;
28   sigma_y = sigma_x;
29   sigma_z = 0.60*x^0.75;
30 endif
31 == if CaseUses == "B" then
32   sigma_x = 0.14*x^0.92;
33   sigma_y = sigma_x;
34   sigma_z = 0.53*x^0.73;
35 endif
36 == if CaseUses == "C" then
37   sigma_x = 0.10*x^0.92;
38   sigma_y = sigma_x;
39   sigma_z = 0.34*x^0.71;
40 endif
41 == if CaseUses == "D" then
42   sigma_x = 0.06*x^0.92;
43   sigma_y = sigma_x;
44   sigma_z = 0.15*x^0.70;
45 endif
46 == if CaseUses == "E" then
47   sigma_x = 0.04*x^0.92;
48   sigma_y = sigma_x;
49   sigma_z = 0.10*x^0.65;
50 endif
51 == if CaseUses == "F" then
52   sigma_x = 0.02*x^0.89;
53   sigma_y = sigma_x;
54   sigma_z = 0.05*x^0.61;
55 endif
56 // Determinação da concentração
57 Conc = Qm/(k*sigma_x*sigma_y*sigma_z);
58
59 End

```

Fonte: Autora

## **APÊNDICE B – Construção da nuvem isocêntrica para liberação instantânea**

Para determinar a área afetada pela liberação acidental de substância tóxica, é necessário a construção da nuvem isocêntrica, definida como a linha que conecta pontos de igual concentração ao redor do limite da nuvem.

A construção da nuvem isocêntrica para liberação instantânea (*puff*) ao nível do solo foi realizada a partir de modificações no modelo matemático de dispersão implementado no ACM, sendo precisa a adição das variáveis  $y$ , *raio* e *Conc1* e das Equações (19), (21) e (22).

O modelo matemático de dispersão implementado para construção da nuvem isocêntrica pode ser observado na Figura 40.



Figura 40 – Implementação do modelo de dispersão para construção da nuvem isocêntrica

```

1  == Model Puff_solo_isocentro
2
3  // Construção da nuvem isocêntrica referente a liberação instantânea (puff) ao nível so solo
4
5  // Definição de massa
6  Qm as mass;
7  // Definição de velocidade
8  u as velocity;
9  // Definição de tempo
10 t as time;
11 // Definição de distância
12 x as length(initial);
13 //Definição de y
14 y as length;
15 // Definição do raio
16 raio as length;
17 // Definição de concentração
18 Conc as conc_mass (lower:0; upper:1e20);
19 // Definição de sigma_x
20 sigma_x as notype;
21 // Definição de sigma_y
22 sigma_y as notype;
23 // Definição de sigma_z
24 sigma_z as notype;
25 // raiz de 2 multiplicada por pi elevado a 3/2 será nomeado de constante, k
26 // Definição de k
27 k as RealParameter (7.874804973);
28 // Definição de uma constante
29 const as RealParameter (2);
30 // Variação da distância no tempo
31 $x=const;
32 // Determinação dos coeficientes de dispersão para as diversas classes de estabilidade atmosférica em condições urbanas:
33 CaseUses AS Case ("A");
34 == if CaseUses == "A" then
35 sigma_x = 0.18*x^0.92;
36 sigma_y = sigma_x;
37 sigma_z = 0.60*x^0.75;
38 endif
39 == if CaseUses == "B" then
40 sigma_x = 0.14*x^0.92;
41 sigma_y = sigma_x;
42 sigma_z = 0.53*x^0.73;
43 endif
44 == if CaseUses == "C" then
45 sigma_x = 0.10*x^0.92;
46 sigma_y = sigma_x;
47 sigma_z = 0.34*x^0.71;
48 endif
49 == if CaseUses == "D" then
50 sigma_x = 0.06*x^0.92;
51 sigma_y = sigma_x;
52 sigma_z = 0.15*x^0.70;
53 endif
54 == if CaseUses == "E" then
55 sigma_x = 0.04*x^0.92;
56 sigma_y = sigma_x;
57 sigma_z = 0.10*x^0.65;
58 endif
59 == if CaseUses == "F" then
60 sigma_x = 0.02*x^0.89;
61 sigma_y = sigma_x;
62 sigma_z = 0.05*x^0.61;
63 endif
64 // Definição da concentração para distância igual a zero
65 ==if x == 0 then
66 Conc = 10000;
67 ==else
68 // Determinação da concentração no centro da nuvem
69 Conc = (Qm/(k*sigma_x*sigma_y*sigma_z));
70 Endif
71 // Determinação da concentração
72 Conc1 = 0.1*Conc;
73 0.1 = exp(-0.5*((raio)/sigma_x)^2);
74 //Determinação de y
75 y = sigma_y*sqrt(2*LOGe(Conc1/3e-6));
76
77 End

```

Fonte: Autora

**APÊNDICE C – Implementação do modelo de dispersão de gás denso para liberação instantânea**

O procedimento para implementação do modelo de dispersão de gás denso de Britter e McQuaid pode ser observado na Figura 41 e Figura 42.

Figura 41 – Primeira parte da implementação do modelo de dispersão de gás denso no ACM

```

1  = Model puff_denso
2
3  // Definição de temperatura
4  Ti as temperature;
5  Tf as temperature;
6  Ta as temperature;
7  // Definição de pressão
8  Pi as pressure;
9  Pf as pressure;
10 // Definição da composição
11 z([1:4]) as molefraction;
12 z1([1:4]) as molefraction;
13 x_frac([1:4]) as molefraction;
14 y_frac([1:4]) as molefraction;
15 vap_frac as vapfraction;
16 // Definição de entalpia
17 H_mol as enth_mol;
18 H_liq as enth_mol_liq;
19 H_vap as enth_mol_vap;
20 // Definição das densidades
21 ro as dens_mass;
22 rol as dens_mass;
23 roar as dens_mass;
24 // Definição da aceleração gravitacional
25 g as RealParameter (9.81);
26 //Definição do empuxo
27 g0 as RealVariable;
28 // Definição da fonte de liberação
29 Di as length;
30 // Definição do volume liberado
31 V0 as volume;
32 // Definição da velocidade
33 u as velocity;
34 // Definição do tempo de liberação
35 Rd as time_;
36 // Definição das distâncias
37 x0 as length;
38 x as length;
39 // Definição do gás liberado
40 Qm as mass;
41 // Definição do critério de gás denso
42 Cr1 as RealVariable;
43 // Definição do critério de liberação
44 Cr2 as RealVariable;
45 // Definição das concentrações
46 C0 as Conc_mass;
47 Cm as Conc_mass;
48 C as Conc_mass;
49 // Definição dos eixos do gráfico
50 alfa as RealVariable;
51 beta as RealVariable;

```

Fonte: Autora

Figura 42 – Segunda parte da implementação do modelo de dispersão de gás denso no ACM

```

53  call(Pi) = pVap_Pressure(Ti, z);
54  call(H_mol) = pEnth_mol_vap(Ti, Pi, z);
55  call(Tf, vap_frac, y_frac, x_frac, H_vap, H_liq) = pFlashPH(Pf, H_mol, z);
56  call(ro) = pDens_Mass_Vap(Tf, Pf, z);
57  call(rol) = pDens_Mass_Liq(Ti, Pi, z);
58  call(roar) = pDens_Mass_Vap(Ta, Pf, z1);
59  // Determinação do empuxo da nuvem
60  g0 = g*(ro - roar)/roar;
61  // Determinação do volume
62  V0 = Qm/ro;
63  // Determinação da dimensão da fonte de liberação
64  Di = V0^1/3;
65  // Determinação da flutuabilidade da nuvem
66  Cr1 = (sqrt(g0*V0))/u*Di;
67  // Determinação do tipo de liberação
68  Cr2 = u*Rd/x0;
69  // Correção do limite de toxicidade
70  Cm = C/(C+(1-C)*((Ta + 273)/(Tf + 273)));
71  // Determinação do alfa
72  alfa = LOG10((g0*(V0^1/3))/(u^2))^1/2;
73  // Determinação do beta
74  = if Cm/C0 == 0.001 then;
75  =   if alfa <= -0.10 then;
76  =     beta = 2.075;
77  =   else;
78  =     beta = -0.27*alfa + 2.05;
79  =   endif
80  = elseif Cm/C0 == 0.002 then;
81  =   if alfa <= 0.27 then;
82  =     beta = 1.83;
83  =   else;
84  =     beta = -0.27*alfa + 2.056;
85  =   endif
86  = elseif Cm/C0 == 0.005 then;
87  =   if alfa <= -0.52 then;
88  =     beta = 1.48;
89  =   elseif alfa <=-0.24 then;
90  =     beta = 0.26*alfa + 1.62;
91  =   else;
92  =     beta = 0.30*alfa + 1.75;
93  =   endif
94  = elseif Cm/C0 == 0.01 then;
95  =   if alfa <= -0.71 then;
96  =     beta = 1.15;
97  =   elseif alfa <=-0.37 then;
98  =     beta = 0.34*alfa + 1.39;
99  =   else;
100  =     beta = -0.38*alfa + 1.66;
101  =   endif
102  = elseif Cm/C0 == 0.02 then;
103  =   if alfa <= -0.66 then;
104  =     beta = 0.95;
105  =   elseif alfa <=0.32 then;
106  =     beta = 0.36*alfa + 1.19;
107  =   else;
108  =     beta = -0.26*alfa + 1.38;
109  =   endif
110  = elseif Cm/C0 == 0.05 then;
111  =   if alfa <= -0.56 then;
112  =     beta = 0.85;
113  =   elseif alfa <=0.31 then;
114  =     beta = 0.26*alfa + 1.00;
115  =   else;
116  =     beta = -0.12*alfa + 1.12;
117  =   endif
118  = else;
119  =   if alfa <= -0.44 then;
120  =     beta = 0.70;
121  =   elseif alfa <=-0.43 then;
122  =     beta = 0.26*alfa + 0.81;
123  =   else;
124  =     beta = 0.93;
125  =   endif
126  =   endif
127  // Determinação da distância
128  beta = LOG10(x/(V0^1/3));
129  End

```

Fonte: Autora

**APÊNDICE D – Implementação do modelo de transição da flutuabilidade para  
liberação instantânea**

O modelo de dispersão de Britter e McQuaid não pode ser utilizado para determinar a distância em que a nuvem tóxica apresenta a concentração correspondente ao limite de toxicidade, devido a flutuabilidade da nuvem de cloro apresentar comportamento neutro nesse ponto.

Por isso, foi necessário implementar o modelo de transição da flutuabilidade da nuvem tóxica, que consiste na combinação dos modelos de dispersão de Britter e McQuaid e Pasquill-Gifford.

O procedimento para implementação desses modelos na ferramenta ACM podem ser observados na Figura 43, Figura 44, Figura 45 e na Figura 46.

Figura 43 – Primeira parte da implementação do modelo de transição de flutuabilidade para liberação instantânea no ACM

```

1  = Model Puff_trans
2  // Definição de temperatura
3  Ti as temperature;
4  Tf as temperature;
5  Ta as temperature;
6  // Definição de pressão
7  Pi as pressure;
8  Pf as pressure;
9  //P_vap as pressure;
10 // Definição da composição
11 z([1:4]) as molefraction;
12 z1([1:4]) as molefraction;
13 x_frac([1:4]) as molefraction;
14 y_frac([1:4]) as molefraction;
15 vap_frac as vapfraction;
16 // Definição de entalpia
17 H_mol as enth_mol;
18 H_liq as enth_mol_liq;
19 H_vap as enth_mol_vap;
20 // Definição de densidade
21 ro as dens_mass;
22 roar as dens_mass;
23 // Definição da aceleração gravitacional
24 g as RealParameter (9.81);
25 // Definição do empuxo
26 g0 as RealVariable;
27 // Definição da fonte de liberação
28 Di as length;
29 // Definição do volume liberado
30 V0 as volume;
31 // Definição da velocidade do vento
32 u as velocity;
33 // Definição do tempo de liberação
34 //Rd as time_;
35 // Definição da distância
36 //x0 as length;
37 x as length;
38 xt as length;

```

Fonte: Autora



Figura 44 – Segunda parte da implementação do modelo de transição de flutuabilidade para liberação instantânea no ACM

```

38 xt as length;
39 xv as length;
40 xnb as length;
41 // Definição de gás liberado
42 Qm as mass;
43 // Definição do critério de gás denso
44 Cr1 as RealVariable;
45 // Definição do critério de liberação
46 //Cr2 as RealVariable;
47 // Definição das concentrações
48 C0 as Conc_mass;
49 Cm as Conc_mass;
50 C as Conc_mass;
51 Cx as Conc_mass;
52 // Definição dos eixos
53 alfa as RealVariable;
54 beta as RealVariable;
55 // Definição de sigma_x
56 sigma_x as notype;
57 sigma_xl as notype;
58 // Definição de sigma_y
59 sigma_y as notype;
60 sigma_yl as notype;
61 // Definição de sigma_z
62 sigma_z as notype;
63 sigma_zl as notype;
64 R as RealVariable;
65 // pi será nomeado como constante, k
66 k as RealParameter (7.874804973);
67 call(Pi) = pVap_Pressure(Ti, z);
68 call(H_mol) = pEnth_mol_vap(Ti, Pi, z);
69 call(Tf, vap_frac, y_frac, x_frac, H_vap, H_liq) = pFlashPH(Pf, H_mol, z);
70 call(ro) = pDens_Mass_Vap(Tf, Pf, z);
71 call (roar) = pDens_Mass_Vap(Ti, Pf, zl);
72 // Determinação do expuxo da nuvem
73 g0 = g*(ro - roar)/roar;
74 // Determinação do volume
75 V0 = Qm/ro;
76 // Determinação da dimensão da fonte de liberação
77 Di = V0^(1/3);
78 // Determinação da flutuabilidade da nuvem
79 Cr1 = ((sqrt(g0*V0))/(u*Di));
80 // Determinação do tipo de liberação
81 //Cr2 = u*Rd/x0;
82 // Determinação da concentração no ponto de liberação
83 C0 = ro;
84 // Determinação da concentração no ponto de transição
85 Cx = ((0.20/(Cr1))^3)*C0;
86 //Correção do limite de toxicidade
87 Cm = C/(C+(1-C)*((Ta +273)/(Tf+273)));
88 // Determinação de alfa
89 alfa = LOG10(((g0*(V0^(1/3)))/(u^2))^(0.5));

```

Fonte: Autora

Figura 45 – Terceira parte da implementação do modelo de transição da flutuabilidade para liberação instantânea no ACM

```

90 // Determinação da razão das concentrações
91 R = Cx/C0;
92 // Determinação do beta
93 = if R <= 0.001 then;
94 =   if alfa <= -0.10 then;
95     beta = 2.075;
96 =   else;
97     beta = -0.27*alfa + 2.05;
98   endif
99 = elseif R <= 0.002 then;
100 =   if alfa <= 0.27 then;
101     beta = 1.83;
102 =   else;
103     beta = -0.27*alfa + 2.056;
104   endif
105 = elseif R <= 0.005 then;
106 =   if alfa <= -0.52 then;
107     beta = 1.48;
108 =   elseif alfa <=-0.24 then;
109     beta = 0.26*alfa + 1.62;
110 =   else;
111     beta = 0.30*alfa + 1.75;
112   endif
113 = elseif R <= 0.01 then;
114 =   if alfa <= -0.71 then;
115     beta = 1.15;
116 =   elseif alfa <=-0.37 then;
117     beta = 0.34*alfa + 1.39;
118 =   else;
119     beta = -0.38*alfa + 1.66;
120   endif
121 = elseif R <= 0.02 then;
122 =   if alfa <= -0.66 then;
123     beta = 0.95;
124 =   elseif alfa <=0.32 then;
125     beta = 0.36*alfa + 1.19;
126 =   else;
127     beta = -0.26*alfa + 1.38;
128   endif
129 = elseif R <= 0.05 then;
130 =   if alfa <= -0.56 then;
131     beta = 0.85;
132 =   elseif alfa <=0.31 then;
133     beta = 0.26*alfa + 1.00;
134 =   else;
135     beta = -0.12*alfa + 1.12;
136   endif
137 = else;
138 =   if alfa <= -0.44 then;
139     beta = 0.70;
140 =   elseif alfa <=-0.43 then;
141     beta = 0.26*alfa + 0.81;
142 =   else;
143     beta = 0.93;
144   endif
145 endif

```

Fonte: Autora



Figura 46 – Quarta parte da implementação do modelo de transição da flutuabilidade para liberação instantânea no ACM

```

146 // Determinação da distância
147 beta = LOG10(xt/(V0^(1/3)));
148 // Determinação dos coeficiente de dispersão para cada classe de estabilidade atmosférica
149 CaseUses AS Case ("A");
150 ⇐ if CaseUses == "A" then
151     sigma_x = 0.18*xv^0.92;
152     sigma_y = sigma_x;
153     sigma_z = 0.60*xv^0.75;
154     sigma_xl = 0.18*xnb^0.92;
155     sigma_y1 = sigma_xl;
156     sigma_zl = 0.60*xnb^0.75;
157 endif
158 ⇐ if CaseUses == "B" then
159     sigma_x = 0.14*xv^0.92;
160     sigma_y = sigma_x;
161     sigma_z = 0.53*xv^0.73;
162     sigma_xl = 0.14*xnb^0.92;
163     sigma_y1 = sigma_xl;
164     sigma_zl = 0.53*xnb^0.73;
165 endif
166 ⇐ if CaseUses == "C" then
167     sigma_x = 0.10*xv^0.92;
168     sigma_y = sigma_x;
169     sigma_z = 0.34*xv^0.71;
170     sigma_xl = 0.10*xnb^0.92;
171     sigma_y1 = sigma_xl;
172     sigma_zl = 0.34*xnb^0.71;
173 endif
174 ⇐ if CaseUses == "D" then
175     sigma_x = 0.06*(xv^(0.92));
176     sigma_y = sigma_x;
177     sigma_z = 0.15*(xv^(0.70));
178     sigma_xl = 0.06*(xnb^(0.92));
179     sigma_y1 = sigma_xl;
180     sigma_zl = 0.15*(xnb^(0.70));
181 endif
182 ⇐ if CaseUses == "E" then
183     sigma_x = 0.04*xv^0.92;
184     sigma_y = sigma_x;
185     sigma_z = 0.10*xv^0.65;
186     sigma_xl = 0.04*xnb^0.92;
187     sigma_y1 = sigma_xl;
188     sigma_zl = 0.10*xnb^0.65;
189 endif
190 ⇐ if CaseUses == "F" then
191     sigma_x = 0.02*xv^0.89;
192     sigma_y = sigma_x;
193     sigma_z = 0.05*xv^0.61;
194     sigma_xl = 0.02*xnb^0.89;
195     sigma_y1 = sigma_xl;
196     sigma_zl = 0.05*xnb^0.61;
197 endif
198 // Determinação do ponto virtual
199 sigma_x*sigma_y*sigma_z = Qm/(Cx*k);
200 // Determinação do ponto no qual a nuvem atinge o limite de toxicidade
201 sigma_xl*sigma_y1*sigma_zl = Qm/(Cm*k);
202 // Determinação da distância atingida pela nuvem tóxica
203 x = (xnb + xt) - xv;
204 End

```

Fonte: Autora

**APÊNDICE E – Dados utilizados na validação do modelo de dispersão de Pasquill-Gifford**

Tabela 34 – Dados para construção da nuvem isocêntrica referente ao acidente de Festus, Missouri

(continua)

Distância (m)	Largura (m)	Largura negativa (m)
10,000	4,885	-4,885
30,000	15,265	-15,265
50,000	23,069	-23,069
70,000	31,192	-31,192
90,000	37,323	-37,323
110,000	42,777	-42,777
130,000	47,642	-47,642
150,000	51,980	-51,980
170,000	55,835	-55,835
190,000	59,241	-59,241
210,000	62,224	-62,224
230,000	64,805	-64,805
250,000	67,000	-67,000
270,000	68,821	-68,821
290,000	70,279	-70,279
310,000	71,380	-71,380

Distância (m)	Largura (m)	Largura negativa (m)
330,000	72,129	-72,129
350,000	72,530	-72,530
370,000	72,584	-72,584
390,000	72,290	-72,290
410,000	71,645	-71,645
430,000	70,645	-70,645
450,000	69,283	-69,283
470,000	67,551	-67,551
490,000	65,438	-65,438
510,000	62,930	-62,930
530,000	60,013	-60,013
550,000	56,666	-56,666
570,000	52,867	-52,867
590,000	48,591	-48,591
610,000	43,806	-43,806
630,000	38,478	-38,478

Tabela 34 - Dados para construção da nuvem isocêntrica referente ao acidente de Festus, Missouri

(conclusão)

Distância (m)	Largura (m)	Largura negativa (m)
650,000	32,565	-32,565
670,000	26,020	-26,020
690,000	18,790	-18,790
710,000	10,811	-10,811
730,000	2,014	-2,014

Fonte: Autora

**APÊNDICE F – Dados do comportamento da concentração em função da distância**

Tabela 35 – Análise da concentração em função da distância para liberação instantânea ao nível do solo para a classe de estabilidade “A”

(continua)

Tempo (s)	Distância (m)	Concentração média (kg/m <sup>3</sup> )
0,000	1,000	65,323
10,000	21,000	0,025
20,000	41,000	0,004
30,000	61,000	0,002
40,000	81,000	7,45E-04
50,000	101,000	4,21E-04
60,000	121,000	2,63E-04
70,000	141,000	1,77E-04
80,000	161,000	1,26E-04
90,000	181,000	9,28E-05
100,000	201,000	7,08E-05
110,000	221,000	5,53E-05
120,000	241,000	4,42E-05
130,000	261,000	3,60E-05
140,000	281,000	2,97E-05

Tempo (s)	Distância (m)	Concentração média (kg/m <sup>3</sup> )
150,000	301,000	2,49E-05
160,000	321,000	2,10E-05
170,000	341,000	1,80E-05
180,000	361,000	1,55E-05
190,000	381,000	1,35E-05
200,000	401,000	1,18E-05
210,000	421,000	1,04E-05
220,000	441,000	9,25E-06
230,000	461,000	8,24E-06
240,000	481,000	7,38E-06
250,000	501,000	6,64E-06
260,000	521,000	6,00E-06
270,000	541,000	5,45E-06
280,000	561,000	4,96E-06
290,000	581,000	4,53E-06

Tabela 35 - Análise da concentração em função da distância para liberação instantânea ao nível do solo para a classe de estabilidade “A”

(conclusão)

Tempo (s)	Distância (m)	Concentração média (kg/m <sup>3</sup> )
300,000	601,000	4,15E-06
310,000	621,000	3,81E-06
320,000	641,000	3,51E-06
330,000	661,000	3,24E-06
340,000	681,000	3,00E-06
350,000	701,000	2,78E-06
360,000	721,000	2,59E-06
370,000	741,000	2,41E-06
380,000	761,000	2,25E-06
390,000	781,000	2,10E-06
400,000	801,000	1,97E-06
410,000	821,000	1,85E-06
420,000	841,000	1,74E-06
430,000	861,000	1,63E-06
440,000	881,000	1,54E-06

Tempo (s)	Distância (m)	Concentração média (kg/m <sup>3</sup> )
450,000	901,000	1,45E-06
460,000	921,000	1,37E-06
470,000	941,000	1,30E-06
480,000	961,000	1,23E-06
490,000	981,000	1,17E-06
500,000	1.001,000	1,11E-06

Fonte: Autora

Tabela 36 – Análise da concentração em função da distância para liberação instantânea ao nível do solo para a classe de estabilidade “B”

(continua)

Tempo (s)	Distância (m)	Concentração média (kg/m <sup>3</sup> )
0,000	1,000	122,244
10,000	21,000	0,049
20,000	41,000	0,009
30,000	61,000	0,003
40,000	81,000	0,002
50,000	101,000	8,63E-04
60,000	121,000	5,43E-04
70,000	141,000	3,66E-04
80,000	161,000	2,60E-04
90,000	181,000	1,93E-04
100,000	201,000	1,47E-04
110,000	221,000	1,15E-04
120,000	241,000	9,24E-05
130,000	261,000	7,52E-05
140,000	281,000	6,22E-05

Tempo (s)	Distância (m)	Concentração média (kg/m <sup>3</sup> )
150,000	301,000	5,22E-05
160,000	321,000	4,42E-05
170,000	341,000	3,78E-05
180,000	361,000	3,27E-05
190,000	381,000	2,85E-05
200,000	401,000	2,50E-05
210,000	421,000	2,20E-05
220,000	441,000	1,95E-05
230,000	461,000	1,74E-05
240,000	481,000	1,56E-05
250,000	501,000	1,41E-05
260,000	521,000	1,27E-05
270,000	541,000	1,16E-05
280,000	561,000	1,05E-05
290,000	581,000	9,62E-06



Tabela 36 - Análise da concentração em função da distância para liberação instantânea ao nível do solo para a classe de estabilidade “B”

(conclusão)

Tempo (s)	Distância (m)	Concentração média (kg/m <sup>3</sup> )
300,000	601,000	8,82E-06
310,000	621,000	8,11E-06
320,000	641,000	7,47E-06
330,000	661,000	6,91E-06
340,000	681,000	6,40E-06
350,000	701,000	5,94E-06
360,000	721,000	5,53E-06
370,000	741,000	5,15E-06
380,000	761,000	4,81E-06
390,000	781,000	4,50E-06
400,000	801,000	4,22E-06
410,000	821,000	3,96E-06
420,000	841,000	3,72E-06
430,000	861,000	3,50E-06
440,000	881,000	3,30E-06

Tempo (s)	Distância (m)	Concentração média (kg/m <sup>3</sup> )
450,000	901,000	3,12E-06
460,000	921,000	2,94E-06
470,000	941,000	2,79E-06
480,000	961,000	2,64E-06
490,000	981,000	2,50E-06
500,000	1.001,000	2,38E-06

Fonte: Autora

Tabela 37 – Análise da concentração em função da distância para liberação instantânea ao nível do solo para a classe de estabilidade “C”

(continua)

Tempo (s)	Distância (m)	Concentração média (kg/m <sup>3</sup> )
0,000	1,000	373,492
10,000	21,000	0,159
20,000	41,000	0,029
30,000	61,000	0,010
40,000	81,000	0,005
50,000	101,000	0,003
60,000	121,000	0,002
70,000	141,000	0,001
80,000	161,000	8,81E-04
90,000	181,000	6,53E-04
100,000	201,000	5,00E-04
110,000	221,000	3,93E-04
120,000	241,000	3,15E-04
130,000	261,000	2,57E-04
140,000	281,000	2,13E-04

Tempo (s)	Distância (m)	Concentração média (kg/m <sup>3</sup> )
150,000	301,000	1,79E-04
160,000	321,000	1,52E-04
170,000	341,000	1,30E-04
180,000	361,000	1,12E-04
190,000	381,000	9,79E-05
200,000	401,000	8,60E-05
210,000	421,000	7,59E-05
220,000	441,000	6,74E-05
230,000	461,000	6,02E-05
240,000	481,000	5,41E-05
250,000	501,000	4,87E-05
260,000	521,000	4,41E-05
270,000	541,000	4,01E-05
280,000	561,000	3,65E-05
290,000	581,000	3,34E-05

Tabela 37 - Análise da concentração em função da distância para liberação instantânea ao nível do solo para a classe de estabilidade “C”

(conclusão)

Tempo (s)	Distância (m)	Concentração média (kg/m <sup>3</sup> )
300,000	601,000	3,06E-05
310,000	621,000	2,82E-05
320,000	641,000	2,60E-05
330,000	661,000	2,40E-05
340,000	681,000	2,23E-05
350,000	701,000	2,07E-05
360,000	721,000	1,93E-05
370,000	741,000	1,80E-05
380,000	761,000	1,68E-05
390,000	781,000	1,57E-05
400,000	801,000	1,47E-05
410,000	821,000	1,38E-05
420,000	841,000	1,30E-05
430,000	861,000	1,22E-05
440,000	881,000	1,16E-05

Tempo (s)	Distância (m)	Concentração média (kg/m <sup>3</sup> )
450,000	901,000	1,09E-05
460,000	921,000	1,03E-05
470,000	941,000	9,76E-06
480,000	961,000	9,25E-06
490,000	981,000	8,78E-06
500,000	1.001,000	8,34E-06

Fonte: Autora

Tabela 38 – Análise da concentração em função da distância para liberação instantânea ao nível do solo para a classe de estabilidade “D”

(continua)

Tempo (s)	Distância (m)	Concentração média (kg/m <sup>3</sup> )
0,000	1,000	2351,620
10,000	21,000	1,033
20,000	41,000	0,188
30,000	61,000	0,069
40,000	81,000	0,033
50,000	101,000	0,019
60,000	121,000	0,012
70,000	141,000	0,008
80,000	161,000	0,006
90,000	181,000	0,004
100,000	201,000	0,003
110,000	221,000	0,003
120,000	241,000	0,002
130,000	261,000	0,002
140,000	281,000	0,001

Tempo (s)	Distância (m)	Concentração média (kg/m <sup>3</sup> )
150,000	301,000	0,001
160,000	321,000	0,001
170,000	341,000	8,67E-04
180,000	361,000	7,50E-04
190,000	381,000	6,54E-04
200,000	401,000	5,75E-04
210,000	421,000	5,08E-04
220,000	441,000	4,51E-04
230,000	461,000	4,03E-04
240,000	481,000	3,62E-04
250,000	501,000	3,26E-04
260,000	521,000	2,96E-04
270,000	541,000	2,69E-04
280,000	561,000	2,45E-04
290,000	581,000	2,24E-04

Tabela 38 - Análise da concentração em função da distância para liberação instantânea ao nível do solo para a classe de estabilidade “D”

(conclusão)

Tempo (s)	Distância (m)	Concentração média (kg/m <sup>3</sup> )
300,000	601,000	2,06E-04
310,000	621,000	1,89E-04
320,000	641,000	1,75E-04
330,000	661,000	1,61E-04
340,000	681,000	1,50E-04
350,000	701,000	1,39E-04
360,000	721,000	1,29E-04
370,000	741,000	1,21E-04
380,000	761,000	1,13E-04
390,000	781,000	1,06E-04
400,000	801,000	9,91E-05
410,000	821,000	9,31E-05
420,000	841,000	8,76E-05
430,000	861,000	8,25E-05
440,000	881,000	7,78E-05

Tempo (s)	Distância (m)	Concentração média (kg/m <sup>3</sup> )
450,000	901,000	7,35E-05
460,000	921,000	6,95E-05
470,000	941,000	6,58E-05
480,000	961,000	6,24E-05
490,000	981,000	5,92E-05
500,000	1.001,000	5,63E-05

Fonte: Autora

Tabela 39 – Análise da concentração em função da distância para liberação instantânea ao nível do solo para a classe de estabilidade “E”

(continua)

Tempo (s)	Distância (m)	Concentração média (kg/m <sup>3</sup> )
0,000	1,000	7936,700
10,000	21,000	4,060
20,000	41,000	0,766
30,000	61,000	0,285
40,000	81,000	0,140
50,000	101,000	0,081
60,000	121,000	0,052
70,000	141,000	0,035
80,000	161,000	0,025
90,000	181,000	0,0189
100,000	201,000	0,015
110,000	221,000	0,011
120,000	241,000	0,009
130,000	261,000	0,008
140,000	281,000	0,006

Tempo (s)	Distância (m)	Concentração média (kg/m <sup>3</sup> )
150,000	301,000	0,005
160,000	321,000	0,004
170,000	341,000	0,004
180,000	361,000	0,003
190,000	381,000	0,003
200,000	401,000	0,003
210,000	421,000	0,002
220,000	441,000	0,002
230,000	461,000	0,002
240,000	481,000	0,002
250,000	501,000	0,001
260,000	521,000	0,001
270,000	541,000	0,001
280,000	561,000	0,001
290,000	581,000	0,001

Tabela 39 - Análise da concentração em função da distância para liberação instantânea ao nível do solo para a classe de estabilidade “E”

(conclusão)

Tempo (s)	Distância (m)	Concentração média (kg/m <sup>3</sup> )
300,000	601,000	9,56E-04
310,000	621,000	8,81E-04
320,000	641,000	8,14E-04
330,000	661,000	7,54E-04
340,000	681,000	7,00E-04
350,000	701,000	6,51E-04
360,000	721,000	6,07E-04
370,000	741,000	5,67E-04
380,000	761,000	5,31E-04
390,000	781,000	4,98E-04
400,000	801,000	4,67E-04
410,000	821,000	4,39E-04
420,000	841,000	4,14E-04
430,000	861,000	3,90E-04
440,000	881,000	3,69E-04

Tempo (s)	Distância (m)	Concentração média (kg/m <sup>3</sup> )
450,000	901,000	3,49E-04
460,000	921,000	3,30E-04
470,000	941,000	3,13E-04
480,000	961,000	2,97E-04
490,000	981,000	2,82E-04
500,000	1.001,000	2,68E-04

Fonte: Autora

Tabela 40 – Análise da concentração em função da distância para liberação instantânea ao nível do solo para a classe de estabilidade “F”

(continua)

Tempo (s)	Distância (m)	Concentração média (kg/m <sup>3</sup> )
0,000	1,000	63493,600
10,000	21,000	44,036
20,000	41,000	8,882
30,000	61,000	3,435
40,000	81,000	1,744
50,000	101,000	1,029
60,000	121,000	0,668
70,000	141,000	0,463
80,000	161,000	0,338
90,000	181,000	0,255
100,000	201,000	0,198
110,000	221,000	0,158
120,000	241,000	0,129
130,000	261,000	0,106
140,000	281,000	0,089

Tempo (s)	Distância (m)	Concentração média (kg/m <sup>3</sup> )
150,000	301,000	0,076
160,000	321,000	0,065
170,000	341,000	0,056
180,000	361,000	0,049
190,000	381,000	0,043
200,000	401,000	0,038
210,000	421,000	0,034
220,000	441,000	0,030
230,000	461,000	0,027
240,000	481,000	0,025
250,000	501,000	0,022
260,000	521,000	0,020
270,000	541,000	0,0186
280,000	561,000	0,017
290,000	581,000	0,016



Tabela 40 - Análise da concentração em função da distância para liberação instantânea ao nível do solo para a classe de estabilidade “F”

(conclusão)

Tempo (s)	Distância (m)	Concentração média (kg/m <sup>3</sup> )
300,000	601,000	0,014
310,000	621,000	0,013
320,000	641,000	0,012
330,000	661,000	0,011
340,000	681,000	0,011
350,000	701,000	0,010
360,000	721,000	0,009
370,000	741,000	0,008
380,000	761,000	0,008
390,000	781,000	0,008
400,000	801,000	0,007
410,000	821,000	0,007
420,000	841,000	0,006
430,000	861,000	0,006
440,000	881,000	0,006

Tempo (s)	Distância (m)	Concentração média (kg/m <sup>3</sup> )
450,000	901,000	0,005
460,000	921,000	0,005
470,000	941,000	0,005
480,000	961,000	0,005
490,000	981,000	0,004
500,000	1.001,000	0,004

Fonte: Autora

Tabela 41 – Análise da concentração em função da distância para liberação instantânea 4 metros do solo para a classe de estabilidade “A”

(continua)

Tempo (s)	Distância (m)	Concentração média (kg/m <sup>3</sup> )
0,000	1,000	0,000
10,000	21,000	0,019
20,000	41,000	0,004
30,000	61,000	0,001
40,000	81,000	7,23E-04
50,000	101,000	4,12E-04
60,000	121,000	2,59E-04
70,000	141,000	1,75E-04
80,000	161,000	1,24E-04
90,000	181,000	9,20E-05
100,000	201,000	7,02E-05
110,000	221,000	5,50E-05
120,000	241,000	4,40E-05
130,000	261,000	3,58E-05
140,000	281,000	2,96E-05

Tempo (s)	Distância (m)	Concentração média (kg/m <sup>3</sup> )
150,000	301,000	2,48E-05
160,000	321,000	2,10E-05
170,000	341,000	1,79E-05
180,000	361,000	1,55E-05
190,000	381,000	1,35E-05
200,000	401,000	1,18E-05
210,000	421,000	1,04E-05
220,000	441,000	9,22E-06
230,000	461,000	8,22E-06
240,000	481,000	7,37E-06
250,000	501,000	6,63E-06
260,000	521,000	5,99E-06
270,000	541,000	5,44E-06
280,000	561,000	4,95E-06
290,000	581,000	4,52E-06

Tabela 41 - Análise da concentração em função da distância para liberação instantânea 4 metros do solo para a classe de estabilidade “A”

(conclusão)

Tempo (s)	Distância (m)	Concentração média (kg/m <sup>3</sup> )
300,000	601,000	4,14E-06
310,000	621,000	3,80E-06
320,000	641,000	3,51E-06
330,000	661,000	3,24E-06
340,000	681,000	3,00E-06
350,000	701,000	2,78E-06
360,000	721,000	2,59E-06
370,000	741,000	2,41E-06
380,000	761,000	2,25E-06
390,000	781,000	2,10E-06
400,000	801,000	1,97E-06
410,000	821,000	1,85E-06
420,000	841,000	1,74E-06
430,000	861,000	1,63E-06
440,000	881,000	1,54E-06

Tempo (s)	Distância (m)	Concentração média (kg/m <sup>3</sup> )
450,000	901,000,000	1,45E-06
460,000	921,000	1,37E-06
470,000	941,000	1,30E-06
480,000	961,000	1,23E-06
490,000	981,000	1,17E-06
500,000	1.001,000	1,11E-06

Fonte: Autora

Tabela 42 – Análise da concentração em função da distância para liberação instantânea 4 metros do solo para a classe de estabilidade “B”

(continua)

Tempo (s)	Distância (m)	Concentração média (kg/m <sup>3</sup> )
0,000	1,000	0,000
10,000	21,000	0,035
20,000	41,000	0,008
30,000	61,000	0,003
40,000	81,000	0,001
50,000	101,000	8,35E-04
60,000	121,000	5,29E-04
70,000	141,000	3,59E-04
80,000	161,000	2,56E-04
90,000	181,000	1,90E-04
100,000	201,000	1,45E-04
110,000	221,000	1,14E-04
120,000	241,000	9,15E-05
130,000	261,000	7,46E-05
140,000	281,000	6,18E-05

Tempo (s)	Distância (m)	Concentração média (kg/m <sup>3</sup> )
150,000	301,000	5,18E-05
160,000	321,000	4,39E-05
170,000	341,000	3,76E-05
180,000	361,000	3,25E-05
190,000	381,000	2,83E-05
200,000	401,000	2,48E-05
210,000	421,000	2,19E-05
220,000	441,000	1,95E-05
230,000	461,000	1,74E-05
240,000	481,000	1,56E-05
250,000	501,000	1,40E-05
260,000	521,000	1,27E-05
270,000	541,000	1,15E-05
280,000	561,000	1,05E-05
290,000	581,000	9,60E-06

Tabela 42 - Análise da concentração em função da distância para liberação instantânea 4 metros do solo para a classe de estabilidade “B”

(conclusão)

Tempo (s)	Distância (m)	Concentração média (kg/m <sup>3</sup> )
300,000	601,000	8,80E-06
310,000	621,000	8,09E-06
320,000	641,000	7,46E-06
330,000	661,000	6,89E-06
340,000	681,000	6,38E-06
350,000	701,000	5,93E-06
360,000	721,000	5,51E-06
370,000	741,000	5,14E-06
380,000	761,000	4,80E-06
390,000	781,000	4,49E-06
400,000	801,000	4,21E-06
410,000	821,000	3,95E-06
420,000	841,000	3,71E-06
430,000	861,000	3,50E-06
440,000	881,000	3,30E-06

Tempo (s)	Distância (m)	Concentração média (kg/m <sup>3</sup> )
450,000	901,000	3,11E-06
460,000	921,000	2,94E-06
470,000	941,000	2,78E-06
480,000	961,000	2,64E-06
490,000	981,000	2,50E-06
500,000	1.001,000	2,37E-06

Fonte: Autora

Tabela 43 – Análise da concentração em função da distância para liberação instantânea 4 metros do solo para a classe de estabilidade “C”

(continua)

Tempo (s)	Distância (m)	Concentração média (kg/m <sup>3</sup> )
0,000	1,000	0,000
10,000	21,000	0,063
20,000	41,000	0,020
30,000	61,000	0,008
40,000	81,000	0,004
50,000	101,000	0,003
60,000	121,000	0,002
70,000	141,000	0,001
80,000	161,000	8,37E-04
90,000	181,000	6,26E-04
100,000	201,000	4,82E-04
110,000	221,000	3,80E-04
120,000	241,000	3,06E-04
130,000	261,000	2,50E-04
140,000	281,000	2,08E-04

Tempo (s)	Distância (m)	Concentração média (kg/m <sup>3</sup> )
150,000	301,000	1,75E-04
160,000	321,000	1,49E-04
170,000	341,000	1,28E-04
180,000	361,000	1,11E-04
190,000	381,000	9,65E-05
200,000	401,000	8,48E-05
210,000	421,000	7,49E-05
220,000	441,000	6,66E-05
230,000	461,000	5,96E-05
240,000	481,000	5,35E-05
250,000	501,000	4,82E-05
260,000	521,000	4,37E-05
270,000	541,000	3,97E-05
280,000	561,000	3,62E-05
290,000	581,000	3,31E-05

Tabela 43 - Análise da concentração em função da distância para liberação instantânea 4 metros do solo para a classe de estabilidade “C”

(conclusão)

Tempo (s)	Distância (m)	Concentração média (kg/m <sup>3</sup> )
300,000	601,000	3,04E-05
310,000	621,000	2,80E-05
320,000	641,000	2,58E-05
330,000	661,000	2,39E-05
340,000	681,000	2,21E-05
350,000	701,000	2,06E-05
360,000	721,000	1,91E-05
370,000	741,000	1,79E-05
380,000	761,000	1,67E-05
390,000	781,000	1,56E-05
400,000	801,000	1,46E-05
410,000	821,000	1,38E-05
420,000	841,000	1,29E-05
430,000	861,000	1,22E-05
440,000	881,000	1,15E-05

Tempo (s)	Distância (m)	Concentração média (kg/m <sup>3</sup> )
450,000	901,000	1,09E-05
460,000	921,000	1,03E-05
470,000	941,000	9,72E-06
480,000	961,000	9,22E-06
490,000	981,000	8,75E-06
500,000	1.001,000	8,31E-06

Fonte: Autora

Tabela 44 – Análise da concentração em função da distância para liberação instantânea 4 metros do solo para classe de estabilidade “D”

(continua)

Tempo (s)	Distância (m)	Concentração média (kg/m <sup>3</sup> )
0,000	1,000	0,000
10,000	21,000	0,007
20,000	41,000	0,026
30,000	61,000	0,022
40,000	81,000	0,016
50,000	101,000	0,011
60,000	121,000	0,008
70,000	141,000	0,006
80,000	161,000	0,004
90,000	181,000	0,003
100,000	201,000	0,003
110,000	221,000	0,002
120,000	241,000	0,002
130,000	261,000	0,001
140,000	281,000	0,001

Tempo (s)	Distância (m)	Concentração média (kg/m <sup>3</sup> )
150,000	301,000	0,001
160,000	321,000	9,06E-04
170,000	341,000	7,84E-04
180,000	361,000	6,83E-04
190,000	381,000	6,00E-04
200,000	401,000	5,30E-04
210,000	421,000	4,71E-04
220,000	441,000	4,21E-04
230,000	461,000	3,77E-04
240,000	481,000	3,40E-04
250,000	501,000	3,08E-04
260,000	521,000	2,79E-04
270,000	541,000	2,55E-04
280,000	561,000	2,33E-04
290,000	581,000	2,14E-04



Tabela 44 - Análise da concentração em função da distância para liberação instantânea 4 metros do solo para classe de estabilidade “D”

(conclusão)

Tempo (s)	Distância (m)	Concentração média (kg/m <sup>3</sup> )
300,000	601,000	1,96E-04
310,000	621,000	1,81E-04
320,000	641,000	1,67E-04
330,000	661,000	1,55E-04
340,000	681,000	1,44E-04
350,000	701,000	1,34E-04
360,000	721,000	1,25E-04
370,000	741,000	1,17E-04
380,000	761,000	1,09E-04
390,000	781,000	1,02E-04
400,000	801,000	9,61E-05
410,000	821,000	9,04E-05
420,000	841,000	8,51E-05
430,000	861,000	8,03E-05
440,000	881,000	7,58E-05

Tempo (s)	Distância (m)	Concentração média (kg/m <sup>3</sup> )
450,000	901,000	7,16E-05
460,000	921,000	6,78E-05
470,000	941,000	6,42E-05
480,000	961,000	6,09E-05
490,000	981,000	5,79E-05
500,000	1.001,000	5,50E-05

Fonte: Autora

Tabela 45 – Análise da concentração em função da distância para liberação instantânea 4 metros do solo para classe de estabilidade “E”

(continua)

Tempo (s)	Distância (m)	Concentração média (kg/m <sup>3</sup> )
0,000	1,000	0,000
10,000	21,000	1,06E-06
20,000	41,000	0,001
30,000	61,000	0,006
40,000	81,000	0,010
50,000	101,000	0,011
60,000	121,000	0,011
70,000	141,000	0,010
80,000	161,000	0,009
90,000	181,000	0,007
100,000	201,000	0,006
110,000	221,000	0,006
120,000	241,000	0,005
130,000	261,000	0,004
140,000	281,000	0,004

Tempo (s)	Distância (m)	Concentração média (kg/m <sup>3</sup> )
150,000	301,000	0,003
160,000	321,000	0,003
170,000	341,000	0,003
180,000	361,000	0,002
190,000	381,000	0,002
200,000	401,000	0,002
210,000	421,000	0,002
220,000	441,000	0,001
230,000	461,000	0,001
240,000	481,000	0,001
250,000	501,000	0,001
260,000	521,000	0,001
270,000	541,000	9,93E-04
280,000	561,000	9,16E-04
290,000	581,000	8,48E-04

Tabela 45 - Análise da concentração em função da distância para liberação instantânea 4 metros do solo para classe de estabilidade “E”

(conclusão)

Tempo (s)	Distância (m)	Concentração média (kg/m <sup>3</sup> )
300,000	601,000	7,86E-04
310,000	621,000	7,30E-04
320,000	641,000	6,80E-04
330,000	661,000	6,34E-04
340,000	681,000	5,93E-04
350,000	701,000	5,55E-04
360,000	721,000	5,21E-04
370,000	741,000	4,89E-04
380,000	761,000	4,60E-04
390,000	781,000	4,33E-04
400,000	801,000	4,09E-04
410,000	821,000	3,86E-04
420,000	841,000	3,65E-04
430,000	861,000	3,45E-04
440,000	881,000	3,27E-04

Tempo (s)	Distância (m)	Concentração média (kg/m <sup>3</sup> )
450,000	901,000	3,11E-04
460,000	921,000	2,95E-04
470,000	941,000	2,81E-04
480,000	961,000	2,67E-04
490,000	981,000	2,54E-04
500,000	1.001,000	2,43E-04

Fonte: Autora

Tabela 46 – Análise da concentração em função da distância para liberação instantânea 4 metros do solo para classe de estabilidade “F”

(continua)

Tempo (s)	Distância (m)	Concentração média (kg/m <sup>3</sup> )
0,000	1,000	0,000
10,000	21,000	8,10E-31
20,000	41,000	1,17E-14
30,000	61,000	2,11E-09
40,000	81,000	5,24E-07
50,000	101,000	1,07E-05
60,000	121,000	6,70E-05
70,000	141,000	2,23E-04
80,000	161,000	5,08E-04
90,000	181,000	9,13E-04
100,000	201,000	0,001
110,000	221,000	0,002
120,000	241,000	0,002
130,000	261,000	0,003
140,000	281,000	0,003

Tempo (s)	Distância (m)	Concentração média (kg/m <sup>3</sup> )
150,000	301,000	0,003
160,000	321,000	0,004
170,000	341,000	0,004
180,000	361,000	0,004
190,000	381,000	0,004
200,000	401,000	0,004
210,000	421,000	0,004
220,000	441,000	0,004
230,000	461,000	0,004
240,000	481,000	0,004
250,000	501,000	0,004
260,000	521,000	0,004
270,000	541,000	0,004
280,000	561,000	0,004
290,000	581,000	0,004

Tabela 46 - Análise da concentração em função da distância para liberação instantânea 4 metros do solo para classe de estabilidade “F”

(conclusão)

Tempo (s)	Distância (m)	Concentração média (kg/m <sup>3</sup> )
300,000	601,000	0,004
310,000	621,000	0,004
320,000	641,000	0,004
330,000	661,000	0,004
340,000	681,000	0,003
350,000	701,000	0,003
360,000	721,000	0,003
370,000	741,000	0,003
380,000	761,000	0,003
390,000	781,000	0,003
400,000	801,000	0,003
410,000	821,000	0,003
420,000	841,000	0,003
430,000	861,000	0,003
440,000	881,000	0,002

Tempo (s)	Distância (m)	Concentração média (kg/m <sup>3</sup> )
450,000	901,000	0,002
460,000	921,000	0,002
470,000	941,000	0,002
480,000	961,000	0,002
490,000	981,000	0,002
500,000	1.001,000	0,002

Fonte: Autora

Tabela 47 – Análise da concentração em função da distância para liberação contínua ao nível do solo para classes de estabilidade “A” e “B”

(continua)

Tempo (s)	Distância (m)	Concentração média (kg/m <sup>3</sup> )
0,000	1,000	0,034
10,000	21,000	7,87E-05
20,000	41,000	2,07E-05
30,000	61,000	9,37E-06
40,000	81,000	5,33E-06
50,000	101,000	3,44E-06
60,000	121,000	2,40E-06
70,000	141,000	1,77E-06
80,000	161,000	1,36E-06
90,000	181,000	1,08E-06
100,000	201,000	8,80E-07
110,000	221,000	7,30E-07
120,000	241,000	6,15E-07
130,000	261,000	5,26E-07
140,000	281,000	4,55E-07

Tempo (s)	Distância (m)	Concentração média (kg/m <sup>3</sup> )
150,000	301,000	3,98E-07
160,000	321,000	3,51E-07
170,000	341,000	3,11E-07
180,000	361,000	2,79E-07
190,000	381,000	2,51E-07
200,000	401,000	2,27E-07
210,000	421,000	2,06E-07
220,000	441,000	1,89E-07
230,000	461,000	1,73E-07
240,000	481,000	1,59E-07
250,000	501,000	1,47E-07
260,000	521,000	1,36E-07
270,000	541,000	1,27E-07
280,000	561,000	1,18E-07
290,000	581,000	1,10E-07

Tabela 47 - Análise da concentração em função da distância para liberação contínua ao nível do solo para classes de estabilidade “A” e “B”

(conclusão)

Tempo (s)	Distância (m)	Concentração média (kg/m <sup>3</sup> )
300,000	601,000	1,03E-07
310,000	621,000	9,71E-08
320,000	641,000	9,14E-08
330,000	661,000	8,61E-08
340,000	681,000	8,13E-08
350,000	701,000	7,69E-08
360,000	721,000	7,29E-08
370,000	741,000	6,91E-08
380,000	761,000	6,57E-08
390,000	781,000	6,25E-08
400,000	801,000	5,95E-08
410,000	821,000	5,68E-08
420,000	841,000	5,42E-08
430,000	861,000	5,18E-08
440,000	881,000	4,96E-08

Tempo (s)	Distância (m)	Concentração média (kg/m <sup>3</sup> )
450,000	901,000	4,75E-08
460,000	921,000	4,56E-08
470,000	941,000	4,38E-08
480,000	961,000	4,20E-08
490,000	981,000	4,04E-08
500,000	1.001,000	3,89E-08

Fonte: Autora

Tabela 48 – Análise da concentração em função da distância para liberação contínua ao nível do solo para a classe de estabilidade “C”

(continua)

Tempo (s)	Distância (m)	Concentração média (kg/m <sup>3</sup> )
0,000	1,000	0,060
10,000	21,000	1,38E-04
20,000	41,000	3,62E-05
30,000	61,000	1,64E-05
40,000	81,000	9,34E-06
50,000	101,000	6,03E-06
60,000	121,000	4,22E-06
70,000	141,000	3,12E-06
80,000	161,000	2,40E-06
90,000	181,000	1,91E-06
100,000	201,000	1,55E-06
110,000	221,000	1,29E-06
120,000	241,000	1,09E-06
130,000	261,000	9,30E-07
140,000	281,000	8,05E-07

Tempo (s)	Distância (m)	Concentração média (kg/m <sup>3</sup> )
150,000	301,000	7,04E-07
160,000	321,000	6,22E-07
170,000	341,000	5,53E-07
180,000	361,000	4,95E-07
190,000	381,000	4,46E-07
200,000	401,000	4,04E-07
210,000	421,000	3,68E-07
220,000	441,000	3,36E-07
230,000	461,000	3,09E-07
240,000	481,000	2,85E-07
250,000	501,000	2,63E-07
260,000	521,000	2,44E-07
270,000	541,000	2,27E-07
280,000	561,000	2,12E-07
290,000	581,000	1,98E-07



Tabela 48 - Análise da concentração em função da distância para liberação contínua ao nível do solo para a classe de estabilidade “C”

(conclusão)

Tempo (s)	Distância (m)	Concentração média (kg/m <sup>3</sup> )
300,000	601,000	1,86E-07
310,000	621,000	1,75E-07
320,000	641,000	1,64E-07
330,000	661,000	1,55E-07
340,000	681,000	1,47E-07
350,000	701,000	1,39E-07
360,000	721,000	1,32E-07
370,000	741,000	1,25E-07
380,000	761,000	1,19E-07
390,000	781,000	1,13E-07
400,000	801,000	1,08E-07
410,000	821,000	1,03E-07
420,000	841,000	9,86E-08
430,000	861,000	9,43E-08
440,000	881,000	9,03E-08

Tempo (s)	Distância (m)	Concentração média (kg/m <sup>3</sup> )
450,000	901,000	8,66E-08
460,000	921,000	8,32E-08
470,000	941,000	7,99E-08
480,000	961,000	7,68E-08
490,000	981,000	7,39E-08
500,000	1.001,000	7,12E-08

Fonte: Autora

Tabela 49 – Análise da concentração em função da distância para liberação contínua ao nível do solo para a classe de estabilidade “D”

(continua)

Tempo (s)	Distância (m)	Concentração média (kg/m <sup>3</sup> )
0,000	1,000	0,118
10,000	21,000	2,71E-04
20,000	41,000	7,15E-05
30,000	61,000	3,25E-05
40,000	81,000	1,86E-05
50,000	101,000	1,20E-05
60,000	121,000	8,43E-06
70,000	141,000	6,25E-06
80,000	161,000	4,83E-06
90,000	181,000	3,84E-06
100,000	201,000	3,14E-06
110,000	221,000	2,61E-06
120,000	241,000	2,21E-06
130,000	261,000	1,90E-06
140,000	281,000	1,65E-06

Tempo (s)	Distância (m)	Concentração média (kg/m <sup>3</sup> )
150,000	301,000	1,44E-06
160,000	321,000	1,28E-06
170,000	341,000	1,14E-06
180,000	361,000	1,02E-06
190,000	381,000	9,25E-07
200,000	401,000	8,40E-07
210,000	421,000	7,67E-07
220,000	441,000	7,03E-07
230,000	461,000	6,47E-07
240,000	481,000	5,98E-07
250,000	501,000	5,55E-07
260,000	521,000	5,16E-07
270,000	541,000	4,81E-07
280,000	561,000	4,50E-07
290,000	581,000	4,22E-07

Tabela 49 - Análise da concentração em função da distância para liberação contínua ao nível do solo para a classe de estabilidade “D”

(conclusão)

Tempo (s)	Distância (m)	Concentração média (kg/m <sup>3</sup> )
300,000	601,000	3,97E-07
310,000	621,000	3,74E-07
320,000	641,000	3,53E-07
330,000	661,000	3,34E-07
340,000	681,000	3,16E-07
350,000	701,000	3,00E-07
360,000	721,000	2,85E-07
370,000	741,000	2,72E-07
380,000	761,000	2,59E-07
390,000	781,000	2,47E-07
400,000	801,000	2,36E-07
410,000	821,000	2,26E-07
420,000	841,000	2,17E-07
430,000	861,000	2,08E-07
440,000	881,000	2,00E-07

Tempo (s)	Distância (m)	Concentração média (kg/m <sup>3</sup> )
450,000	901,000	1,92E-07
460,000	921,000	1,85E-07
470,000	941,000	1,78E-07
480,000	961,000	1,71E-07
490,000	981,000	1,65E-07
500,000	1.001,000	1,60E-07

Fonte: Autora

Tabela 50 – Análise da concentração em função da distância para liberação contínua ao nível do solo para as classes de estabilidade “E” e “F”

(continua)

Tempo (s)	Distância (m)	Concentração média (kg/m <sup>3</sup> )
0,000	1,000	0,302
10,000	21,000	6,99E-04
20,000	41,000	1,86E-04
30,000	61,000	8,57E-05
40,000	81,000	4,95E-05
50,000	101,000	3,24E-05
60,000	121,000	2,29E-05
70,000	141,000	1,72E-05
80,000	161,000	1,34E-05
90,000	181,000	1,07E-05
100,000	201,000	8,85E-06
110,000	221,000	7,43E-06
120,000	241,000	6,34E-06
130,000	261,000	5,49E-06
140,000	281,000	4,80E-06

Tempo (s)	Distância (m)	Concentração média (kg/m <sup>3</sup> )
150,000	301,000	4,24E-06
160,000	321,000	3,78E-06
170,000	341,000	3,40E-06
180,000	361,000	3,07E-06
190,000	381,000	2,80E-06
200,000	401,000	2,56E-06
210,000	421,000	2,35E-06
220,000	441,000	2,17E-06
230,000	461,000	2,01E-06
240,000	481,000	1,87E-06
250,000	501,000	1,74E-06
260,000	521,000	1,63E-06
270,000	541,000	1,53E-06
280,000	561,000	1,44E-06
290,000	581,000	1,36E-06

Tabela 50 - Análise da concentração em função da distância para liberação contínua ao nível do solo para as classes de estabilidade “E” e “F”

(conclusão)

Tempo (s)	Distância (m)	Concentração média (kg/m <sup>3</sup> )
300,000	601,000	1,28E-06
310,000	621,000	1,21E-06
320,000	641,000	1,15E-06
330,000	661,000	1,09E-06
340,000	681,000	1,04E-06
350,000	701,000	9,94E-07
360,000	721,000	9,50E-07
370,000	741,000	9,08E-07
380,000	761,000	8,70E-07
390,000	781,000	8,34E-07
400,000	801,000	8,01E-07
410,000	821,000	7,70E-07
420,000	841,000	7,41E-07
430,000	861,000	7,14E-07
440,000	881,000	6,88E-07

Tempo (s)	Distância (m)	Concentração média (kg/m <sup>3</sup> )
450,000	901,000	6,64E-07
460,000	921,000	6,42E-07
470,000	941,000	6,20E-07
480,000	961,000	6,00E-07
490,000	981,000	5,81E-07
500,000	1.001,000	5,63E-07

Fonte: Autora

Tabela 51 – Análise da concentração em função da distância para liberação contínua 4 metros do solo para as classes de estabilidade “A” e “B”

(continua)

Tempo (s)	Distância (m)	Concentração média (kg/m <sup>3</sup> )
0,000	1,000	0,000
10,000	21,000	5,74E-05
20,000	41,000	1,91E-05
30,000	61,000	9,03E-06
40,000	81,000	5,22E-06
50,000	101,000	3,39E-06
60,000	121,000	2,38E-06
70,000	141,000	1,76E-06
80,000	161,000	1,36E-06
90,000	181,000	1,08E-06
100,000	201,000	8,77E-07
110,000	221,000	7,28E-07
120,000	241,000	6,14E-07
130,000	261,000	5,25E-07
140,000	281,000	4,54E-07

Tempo (s)	Distância (m)	Concentração média (kg/m <sup>3</sup> )
150,000	301,000	3,97E-07
160,000	321,000	3,50E-07
170,000	341,000	3,11E-07
180,000	361,000	2,78E-07
190,000	381,000	2,51E-07
200,000	401,000	2,27E-07
210,000	421,000	2,06E-07
220,000	441,000	1,88E-07
230,000	461,000	1,73E-07
240,000	481,000	1,59E-07
250,000	501,000	1,47E-07
260,000	521,000	1,36E-07
270,000	541,000	1,27E-07
280,000	561,000	1,18E-07
290,000	581,000	1,10E-07

Tabela 51 - Análise da concentração em função da distância para liberação contínua 4 metros do solo para as classes de estabilidade “A” e “B”

(conclusão)

Tempo (s)	Distância (m)	Concentração média (kg/m <sup>3</sup> )
300,000	601,000	1,03E-07
310,000	621,000	9,71E-08
320,000	641,000	9,13E-08
330,000	661,000	8,61E-08
340,000	681,000	8,13E-08
350,000	701,000	7,69E-08
360,000	721,000	7,28E-08
370,000	741,000	6,91E-08
380,000	761,000	6,57E-08
390,000	781,000	6,25E-08
400,000	801,000	5,95E-08
410,000	821,000	5,68E-08
420,000	841,000	5,42E-08
430,000	861,000	5,18E-08
440,000	881,000	4,96E-08

Tempo (s)	Distância (m)	Concentração média (kg/m <sup>3</sup> )
450,000	901,000	4,75E-08
460,000	921,000	4,56E-08
470,000	941,000	4,38E-08
480,000	961,000	4,20E-08
490,000	981,000	4,04E-08
500,000	1.001,000	3,89E-08

Fonte: Autora

Tabela 52 – Análise da concentração em função da distância para liberação contínua 4 metros solo para a classe de estabilidade “C”

(continua)

Tempo (s)	Distância (m)	Concentração média (kg/m <sup>3</sup> )
0,000	1,000	0,000
10,000	21,000	8,73E-05
20,000	41,000	3,21E-05
30,000	61,000	1,55E-05
40,000	81,000	9,06E-06
50,000	101,000	5,91E-06
60,000	121,000	4,16E-06
70,000	141,000	3,09E-06
80,000	161,000	2,38E-06
90,000	181,000	1,89E-06
100,000	201,000	1,54E-06
110,000	221,000	1,28E-06
120,000	241,000	1,08E-06
130,000	261,000	9,28E-07
140,000	281,000	8,03E-07

Tempo (s)	Distância (m)	Concentração média (kg/m <sup>3</sup> )
150,000	301,000	7,03E-07
160,000	321,000	6,20E-07
170,000	341,000	5,52E-07
180,000	361,000	4,94E-07
190,000	381,000	4,45E-07
200,000	401,000	4,03E-07
210,000	421,000	3,67E-07
220,000	441,000	3,36E-07
230,000	461,000	3,08E-07
240,000	481,000	2,84E-07
250,000	501,000	2,63E-07
260,000	521,000	2,44E-07
270,000	541,000	2,27E-07
280,000	561,000	2,12E-07
290,000	581,000	1,98E-07



Tabela 52 - Análise da concentração em função da distância para liberação contínua 4 metros solo para a classe de estabilidade “C”

(conclusão)

Tempo (s)	Distância (m)	Concentração média (kg/m <sup>3</sup> )
300,000	601,000	1,86E-07
310,000	621,000	1,75E-07
320,000	641,000	1,64E-07
330,000	661,000	1,55E-07
340,000	681,000	1,47E-07
350,000	701,000	1,39E-07
360,000	721,000	1,32E-07
370,000	741,000	1,25E-07
380,000	761,000	1,19E-07
390,000	781,000	1,13E-07
400,000	801,000	1,08E-07
410,000	821,000	1,03E-07
420,000	841,000	9,85E-08
430,000	861,000	9,43E-08
440,000	881,000	9,03E-08

Tempo (s)	Distância (m)	Concentração média (kg/m <sup>3</sup> )
450,000	901,000	8,66E-08
460,000	921,000	8,31E-08
470,000	941,000	7,99E-08
480,000	961,000	7,68E-08
490,000	981,000	7,39E-08
500,000	1.001,000	7,12E-08

Fonte: Autora

Tabela 53 – Análise da concentração em função da distância para liberação contínua 4 metros do solo para a classe de estabilidade “D”

(continua)

Tempo (s)	Distância (m)	Concentração média (kg/m <sup>3</sup> )
0,000	1,000	0,000
10,000	21,000	1,06E-04
20,000	41,000	5,59E-05
30,000	61,000	2,91E-05
40,000	81,000	1,74E-05
50,000	101,000	1,15E-05
60,000	121,000	8,19E-06
70,000	141,000	6,12E-06
80,000	161,000	4,75E-06
90,000	181,000	3,79E-06
100,000	201,000	3,10E-06
110,000	221,000	2,59E-06
120,000	241,000	2,19E-06
130,000	261,000	1,89E-06
140,000	281,000	1,64E-06

Tempo (s)	Distância (m)	Concentração média (kg/m <sup>3</sup> )
150,000	301,000	1,44E-06
160,000	321,000	1,27E-06
170,000	341,000	1,14E-06
180,000	361,000	1,02E-06
190,000	381,000	9,22E-07
200,000	401,000	8,37E-07
210,000	421,000	7,65E-07
220,000	441,000	7,01E-07
230,000	461,000	6,46E-07
240,000	481,000	5,97E-07
250,000	501,000	5,53E-07
260,000	521,000	5,15E-07
270,000	541,000	4,80E-07
280,000	561,000	4,49E-07
290,000	581,000	4,22E-07

Tabela 53 - Análise da concentração em função da distância para liberação contínua 4 metros do solo para a classe de estabilidade “D”

(conclusão)

Tempo (s)	Distância (m)	Concentração média (kg/m <sup>3</sup> )
300,000	601,000	3,96E-07
310,000	621,000	3,73E-07
320,000	641,000	3,52E-07
330,000	661,000	3,33E-07
340,000	681,000	3,16E-07
350,000	701,000	3,00E-07
360,000	721,000	2,85E-07
370,000	741,000	2,71E-07
380,000	761,000	2,59E-07
390,000	781,000	2,47E-07
400,000	801,000	2,36E-07
410,000	821,000	2,26E-07
420,000	841,000	2,16E-07
430,000	861,000	2,08E-07
440,000	881,000	1,99E-07

Tempo (s)	Distância (m)	Concentração média (kg/m <sup>3</sup> )
450,000	901,000	1,92E-07
460,000	921,000	1,84E-07
470,000	941,000	1,78E-07
480,000	961,000	1,71E-07
490,000	981,000	1,65E-07
500,000	1.001,000	1,59E-07

Fonte: Autora

Tabela 54 – Análise da concentração em função da distância para liberação contínua 4 metros solo para as classes de estabilidade “E” e “F”

(continua)

Tempo (s)	Distância (m)	Concentração média (kg/m <sup>3</sup> )
0,000	1,000	0
10,000	21,000	3,74E-05
20,000	41,000	8,46E-05
30,000	61,000	5,94E-05
40,000	81,000	3,99E-05
50,000	101,000	2,81E-05
60,000	121,000	2,07E-05
70,000	141,000	1,59E-05
80,000	161,000	1,26E-05
90,000	181,000	1,02E-05
100,000	201,000	8,50E-06
110,000	221,000	7,18E-06
120,000	241,000	6,16E-06
130,000	261,000	5,35E-06
140,000	281,000	4,69E-06

Tempo (s)	Distância (m)	Concentração média (kg/m <sup>3</sup> )
150,000	301,000	4,16E-06
160,000	321,000	3,72E-06
170,000	341,000	3,34E-06
180,000	361,000	3,03E-06
190,000	381,000	2,76E-06
200,000	401,000	2,52E-06
210,000	421,000	2,32E-06
220,000	441,000	2,14E-06
230,000	461,000	1,99E-06
240,000	481,000	1,85E-06
250,000	501,000	1,73E-06
260,000	521,000	1,62E-06
270,000	541,000	1,52E-06
280,000	561,000	1,43E-06
290,000	581,000	1,35E-06

Tabela 54 - Análise da concentração em função da distância para liberação contínua 4 metros solo para as classes de estabilidade “E” e “F”

(conclusão)

Tempo (s)	Distância (m)	Concentração média (kg/m <sup>3</sup> )
300,000	601,000	1,27E-06
310,000	621,000	1,21E-06
320,000	641,000	1,15E-06
330,000	661,000	1,09E-06
340,000	681,000	1,04E-06
350,000	701,000	9,89E-07
360,000	721,000	9,45E-07
370,000	741,000	9,04E-07
380,000	761,000	8,66E-07
390,000	781,000	8,31E-07
400,000	801,000	7,98E-07
410,000	821,000	7,67E-07
420,000	841,000	7,38E-07
430,000	861,000	7,11E-07
440,000	881,000	6,86E-07

Tempo (s)	Distância (m)	Concentração média (kg/m <sup>3</sup> )
450,000	901,000	6,62E-07
460,000	921,000	6,39E-07
470,000	941,000	6,18E-07
480,000	961,000	5,98E-07
490,000	981,000	5,79E-07
500,000	1.001,000	5,61E-07

Fonte: Autora

**APÊNDICE G – Dados para construção das nuvens isocêntricas**

Tabela 55 – Dados para construção da nuvem isocêntrica referente à liberação instantânea (*puff*) ao nível do solo para a classe de estabilidade “A”

Distância (m)	Largura (m)	Largura negativa (m)
1,386	0,972	- 0,972
27,358	10,852	- 10,852
52,767	17,296	- 17,296
77,959	22,202	- 22,202
103,014	26,000	- 26,000
127,969	28,880	- 28,880
152,846	30,934	- 30,934
177,658	32,198	- 32,198
202,416	32,671	- 32,671
227,127	32,307	- 32,307
251,796	31,009	- 31,009
276,429	28,585	- 28,585
301,027	24,641	- 24,641
325,595	18,135	- 18,135
347,683	4,082	- 4,082

Fonte: Autora

Tabela 56 – Dados para construção da nuvem isocêntrica referente à liberação instantânea (*puff*) ao nível do solo para a classe de estabilidade “D”

(continua)

Distância (m)	Largura (m)	Largura negativa (m)
1,129	0,362	- 0,362
23,119	4,513	- 4,513
44,922	7,643	- 7,643
66,653	10,361	- 10,361
88,338	12,808	- 12,808
109,990	15,051	- 15,051
131,615	17,129	- 17,129
153,219	19,069	- 19,069
174,805	20,886	- 20,886
196,376	22,596	- 22,596
217,932	24,208	- 24,208
239,476	25,731	- 25,731
261,009	27,170	- 27,170
282,532	28,532	- 28,532
304,045	29,821	- 29,821
325,550	31,041	- 31,041

Distância (m)	Largura (m)	Largura negativa (m)
347,047	32,194	-32,194
368,536	33,284	-33,284
390,019	34,313	-34,313
411,495	35,283	-35,283
432,964	36,196	-36,196
454,428	37,052	-37,052
475,886	37,854	-37,854
497,339	38,603	-38,603
518,787	39,299	-39,299
540,23	39,943	-39,943
561,668	40,536	-40,536
583,103	41,079	-41,079
604,533	41,571	-41,571
625,958	42,013	-42,013
647,381	42,405	-42,405
668,799	42,747	-42,747



Tabela 56 - Dados para construção da nuvem isocêntrica referente à liberação instantânea (*puff*) ao nível do solo para a classe de estabilidade “D”  
(conclusão)

Distância (m)	Largura (m)	Largura negativa (m)
690,213	43,039	- 43,039
711,623	43,281	- 43,281
733,031	43,472	- 43,472
754,436	43,613	- 43,613
775,837	43,701	- 43,701
797,234	43,737	- 43,737
818,629	43,720	- 43,720
840,021	43,649	- 43,649
861,410	43,522	- 43,522
882,797	43,338	- 43,338
904,181	43,096	- 43,096
925,561	42,793	- 42,793
946,939	42,428	- 42,428
968,316	41,998	- 41,998
989,690	41,501	- 41,501
1.011,060	40,932	- 40,932

Fonte: Autora

Distância (m)	Largura (m)	Largura negativa (m)
1.032,430	40,288	- 40,288
1.053,80	39,566	- 39,566
1.075,160	38,759	- 38,759
1.096,520	37,861	- 37,861
1.117,880	36,865	- 36,865
1.139,240	35,763	- 35,763
1.160,600	34,542	- 34,542
1.181,950	33,190	- 33,190
1.203,300	31,689	- 31,689
1.224,650	30,015	- 30,015
1.246,000	28,136	- 28,136
1.267,340	26,009	- 26,009
1.288,690	23,563	- 23,563
1.310,030	20,687	- 20,687
1.331,370	17,162	- 17,162
1.352,710	12,449	- 12,449
1.374,050	2,990	- 2,990

Tabela 57 – Dados para construção da nuvem isocêntrica referente à liberação instantânea (*puff*) ao nível do solo para a classe de estabilidade “F”

(continua)

Distância (m)	Largura (m)	Largura negativa (m)
1,043	0,13107	-0,1311
21,645	1,60098	-1,601
42,170	2,73564	-2,7356
62,666	3,74637	-3,7464
83,144	4,67954	-4,6795
103,609	5,55648	-5,5565
124,064	6,38945	-6,3895
144,511	7,18639	-7,1864
164,951	7,95288	-7,9529
185,385	8,69299	-8,693
205,814	9,40987	-9,4099
226,238	10,106	-10,106
246,658	10,7834	-10,783
267,074	11,4437	-11,444
287,486	12,0883	-12,088
307,896	12,7184	-12,718
328,302	13,335	-13,335

Distância (m)	Largura (m)	Largura negativa (m)
348,705	13,939	-13,939
369,106	14,531	-14,531
389,505	15,112	-15,112
409,901	15,683	-15,683
430,295	16,243	-16,243
450,687	16,794	-16,794
471,077	17,336	-17,336
491,465	17,869	-17,869
511,852	18,394	-18,394
532,237	18,911	-18,911
552,620	19,420	-19,420
573,001	19,922	-19,922
593,381	20,417	-20,417
613,76	20,905	-20,905
634,137	21,386	-21,386
654,513	21,861	-21,861
674,888	22,330	-22,330

Tabela 57 – Dados para construção da nuvem isocêntrica referente à liberação instantânea (*puff*) ao nível do solo para a classe de estabilidade “F”

(continuação)

Distância (m)	Largura (m)	Largura negativa (m)
674,888	22,33	-22,33
695,261	22,793	-22,793
715,633	23,250	-23,250
736,004	23,701	-23,701
756,374	24,146	-24,146
776,743	24,587	-24,587
797,111	25,022	-25,022
817,477	25,452	-25,452
837,843	25,876	-25,876
858,208	26,296	-26,296
878,571	26,712	-26,712
898,934	27,122	-27,122
919,296	27,528	-27,528
939,657	27,930	-27,930
960,017	28,327	-28,327
980,376	28,720	-28,720
1.000,735	29,109	-29,109

Distância (m)	Largura (m)	Largura negativa (m)
1.021,093	29,493	-29,493
1.041,450	29,874	-29,874
1.061,806	30,250	-30,250
1.082,161	30,623	-30,623
1.102,516	30,992	-30,992
1.122,869	31,357	-31,357
1.143,223	31,718	-31,718
1.163,575	32,075	-32,075
1.183,927	32,430	-32,430
1.204,278	32,780	-32,780
1.224,629	33,127	-33,127
1.244,979	33,471	-33,471
1.265,328	33,811	-33,811
1.285,677	34,148	-34,148
1.306,025	34,481	-34,481
1.326,372	34,812	-34,812
1.346,719	35,139	-35,139

Tabela 57 – Dados para construção da nuvem isocêntrica referente à liberação instantânea (*puff*) ao nível do solo para a classe de estabilidade “F”

(continuação)

Distância (m)	Largura (m)	Largura negativa (m)
1.367,065	35,463	-35,463
1.387,411	35,784	-35,784
1.407,756	36,102	-36,102
1.428,101	36,416	-36,416
1.448,445	36,728	-36,728
1.468,788	37,037	-37,037
1.489,131	37,343	-37,343
1.509,474	37,646	-37,646
1.529,816	37,946	-37,946
1550,157	38,243	-38,243
1.570,498	38,538	-38,538
1.590,838	38,829	-38,829
1.611,178	39,118	-39,118
1.631,518	39,404	-39,404
1.651,857	39,688	-39,688
1.672,195	39,969	-39,969
1.692,534	40,247	-40,247

Distância (m)	Largura (m)	Largura negativa (m)
1.712,872	40,523	-40,523
1.733,209	40,796	-40,796
1.753,546	41,066	-41,066
1.773,882	41,334	-41,334
1.794,218	41,599	-41,599
1.814,554	41,862	-41,862
1.834,889	42,123	-42,123
1.855,224	42,381	-42,381
1.875,558	42,636	-42,636
1.895,892	42,889	-42,889
1.916,225	43,140	-43,140
1.936,558	43,388	-43,388
1.956,891	43,634	-43,634
1.977,223	43,878	-43,878
1.997,555	44,119	-44,119
2.017,887	44,358	-44,358
2.038,218	44,595	-44,595

Tabela 57 – Dados para construção da nuvem isocêntrica referente à liberação instantânea (*puff*) ao nível do solo para a classe de estabilidade “F”

(continuação)

Distância (m)	Largura (m)	Largura negativa (m)
2.058,549	44,829	-44,829
2.078,880	45,061	-45,061
2.099,210	45,291	-45,291
2.119,540	45,519	-45,519
2.139,869	45,745	-45,745
2.160,199	45,968	-45,968
2.180,528	46,189	-46,189
2.200,856	46,408	-46,408
2.221,184	46,625	-46,625
2.241,512	46,839	-46,839
2.261,839	47,052	-47,052
2.282,167	47,262	-47,262
2.302,493	47,470	-47,470
2.322,820	47,677	-47,677
2.343,146	47,881	-47,881
2.363,472	48,083	-48,083
2.383,797	48,283	-48,283

Distância (m)	Largura (m)	Largura negativa (m)
2.404,123	48,480	-48,480
2.424,447	48,676	-48,676
2.444,772	48,870	-48,870
2.465,096	49,062	-49,062
2.485,420	49,252	-49,252
2.505,744	49,440	-49,440
2.526,068	49,625	-49,625
2.546,391	49,809	-49,809
2.566,713	49,991	-49,991
2.587,036	50,171	-50,171
2.607,359	50,349	-50,349
2.627,681	50,525	-50,525
2.648,003	50,699	-50,699
2.668,324	50,871	-50,871
2.688,646	51,041	-51,041
2.708,967	51,209	-51,209
2.729,288	51,376	-51,376

Tabela 57 – Dados para construção da nuvem isocêntrica referente à liberação instantânea (*puff*) ao nível do solo para a classe de estabilidade “F”

(continuação)

Distância (m)	Largura (m)	Largura negativa (m)
2.749,608	51,540	-51,540
2.769,928	51,703	-51,703
2.790,248	51,863	-51,863
2.810,568	52,022	-52,022
2.830,887	52,179	-52,179
2.851,206	52,334	-52,334
2.871,525	52,487	-52,487
2.891,844	52,638	-52,638
2.912,162	52,788	-52,788
2.932,480	52,935	-52,935
2.952,798	53,081	-53,081
2.973,116	53,225	-53,225
2.993,433	53,367	-53,367
3.013,751	53,507	-53,507
3.034,067	53,646	-53,646
3.054,384	53,782	-53,782
3.074,701	53,917	-53,917

Distância (m)	Largura (m)	Largura negativa (m)
3.095,017	54,050	-54,050
3.115,333	54,182	-54,182
3.135,649	54,311	-54,311
3.155,964	54,439	-54,439
3.176,280	54,564	-54,564
3.196,595	54,688	-54,688
3.216,910	54,811	-54,811
3.237,225	54,931	-54,931
3.257,539	55,050	-55,050
3.277,853	55,167	-55,167
3.298,167	55,282	-55,282
3.318,482	55,395	-55,395
3.338,796	55,507	-55,507
3.359,109	55,617	-55,617
3.379,422	55,725	-55,725
3.399,735	55,831	-55,831
3.420,048	55,936	-55,936

Tabela 57 – Dados para construção da nuvem isocêntrica referente à liberação instantânea (*puff*) ao nível do solo para a classe de estabilidade “F”

(continuação)

Distância (m)	Largura(m)	Largura negativa (m)
3.440,361	56,039	-56,039
3.460,673	56,140	-56,140
3.480,985	56,239	-56,239
3.501,297	56,337	-56,337
3.521,609	56,433	-56,433
3.541,921	56,527	-56,527
3.562,232	56,619	-56,619
3.582,543	56,710	-56,710
3.602,854	56,799	-56,799
3.623,165	56,886	-56,886
3.643,476	56,972	-56,972
3.663,786	57,055	-57,055
3.684,096	57,137	-57,137
3.704,407	57,218	-57,218
3.724,716	57,296	-57,296
3.745,026	57,373	-57,373
3.765,336	57,448	-57,448

Distância (m)	Largura (m)	Largura negativa (m)
3.785,645	57,521	-57,521
3.805,954	57,593	-57,593
3.826,263	57,663	-57,663
3.846,572	57,731	-57,731
3.866,880	57,798	-57,798
3.887,189	57,862	-57,862
3.907,497	57,925	-57,925
3.927,805	57,987	-57,987
3.948,113	58,046	-58,046
3.968,420	58,104	-58,104
3.988,728	58,160	-58,160
4.009,035	58,214	-58,214
4.029,342	58,267	-58,267
4.049,649	58,318	-58,318
4.069,956	58,367	-58,367
4.090,263	58,415	-58,415
4.110,569	58,460	-58,460

Tabela 57 – Dados para construção da nuvem isocêntrica referente à liberação instantânea (*puff*) ao nível do solo para a classe de estabilidade “F”

(continuação)

Distância (m)	Largura (m)	Largura negativa (m)
4.130,876	58,504	-58,504
4.151,182	58,547	-58,547
4.171,488	58,587	-58,587
4.191,794	58,626	-58,626
4.212,100	58,663	-58,663
4.232,405	58,698	-58,698
4.252,711	58,732	-58,732
4.273,017	58,764	-58,764
4.293,322	58,794	-58,794
4.313,627	58,822	-58,822
4.333,931	58,848	-58,848
4.354,236	58,873	-58,873
4.374,540	58,896	-58,896
4.394,844	58,917	-58,917
4.415,148	58,937	-58,937
4.435,452	58,955	-58,955
4.455,756	58,971	-58,971

Distância (m)	Largura (m)	Largura negativa (m)
4.476,060	58,985	-58,985
4.496,363	58,997	-58,997
4.516,666	59,008	-59,008
4.536,971	59,017	-59,017
4.557,274	59,024	-59,024
4.577,577	59,029	-59,029
4.597,880	59,032	-59,032
4.618,182	59,034	-59,034
4.638,485	59,034	-59,034
4.658,787	59,032	-59,032
4.679,089	59,028	-59,028
4.699,391	59,023	-59,023
4.719,693	59,015	-59,015
4.739,995	59,006	-59,006
4.760,296	58,995	-58,995
4.780,598	58,982	-58,982
4.800,899	58,967	-58,967



Tabela 57 – Dados para construção da nuvem isocêntrica referente à liberação instantânea (*puff*) ao nível do solo para a classe de estabilidade “F”

(continuação)

Distância (m)	Largura (m)	Largura negativa (m)
4.821,200	58,950	-58,950
4.841,501	58,932	-58,932
4.861,802	58,912	-58,912
4.882,103	58,889	-58,889
4.902,403	58,865	-58,865
4.922,704	58,839	-58,839
4.943,004	58,811	-58,811
4.963,304	58,782	-58,782
4.983,605	58,750	-58,750
5.003,904	58,716	-58,716
5.024,204	58,681	-58,681
5.044,504	58,644	-58,644
5.064,803	58,604	-58,604
5.085,103	58,563	-58,563
5.105,402	58,520	-58,520
5.125,701	58,475	-58,475
5.146,000	58,427	-58,427

Distância (m)	Largura (m)	Largura negativa (m)
5.166,299	58,378	-58,378
5.186,597	58,327	-58,327
5.206,896	58,274	-58,274
5.227,195	58,219	-58,219
5.247,493	58,162	-58,162
5.267,791	58,103	-58,103
5.288,089	58,042	-58,042
5.308,387	57,979	-57,979
5.328,685	57,913	-57,913
5.348,983	57,846	-57,846
5.369,280	57,777	-57,777
5.389,578	57,705	-57,705
5.409,875	57,632	-57,632
5.430,172	57,556	-57,556
5.450,470	57,478	-57,478
5.470,767	57,399	-57,399
5.491,063	57,317	-57,317

Tabela 57 – Dados para construção da nuvem isocêntrica referente à liberação instantânea (*puff*) ao nível do solo para a classe de estabilidade “F”

(continuação)

Distância (m)	Largura (m)	Largura negativa (m)
5.511,360	57,232	-57,232
5.531,657	57,146	-57,146
5.551,953	57,058	-57,058
5.572,250	56,967	-56,967
5.592,546	56,874	-56,874
5.612,842	56,779	-56,779
5.633,138	56,681	-56,681
5.653,434	56,582	-56,582
5.673,730	56,480	-56,480
5.694,025	56,376	-56,376
5.714,321	56,269	-56,269
5.734,616	56,161	-56,161
5.754,912	56,049	-56,049
5.775,207	55,936	-55,936
5.795,502	55,820	-55,820
5.815,797	55,702	-55,702
5.836,092	55,581	-55,581

Distância (m)	Largura (m)	Largura negativa (m)
5.856,386	55,458	-55,458
5.876,681	55,333	-55,333
5.896,976	55,205	-55,205
5.917,270	55,075	-55,075
5.937,564	54,942	-54,942
5.957,859	54,806	-54,806
5.978,153	54,668	-54,668
5.998,447	54,528	-54,528
6.018,741	54,384	-54,384
6.039,036	54,239	-54,239
6.059,329	54,090	-54,090
6.079,623	53,939	-53,939
6.099,916	53,785	-53,785
6.120,210	53,629	-53,629
6.140,503	53,470	-53,470
6.160,796	53,308	-53,308
6.181,089	53,143	-53,143

Tabela 57 – Dados para construção da nuvem isocêntrica referente à liberação instantânea (*puff*) ao nível do solo para a classe de estabilidade “F”

(continuação)

Distância (m)	Largura (m)	Largura negativa (m)
6.201,382	52,975	-52,975
6.221,675	52,805	-52,805
6.241,968	52,631	-52,631
6.262,260	52,455	-52,455
6.282,553	52,276	-52,276
6.302,845	52,094	-52,094
6.323,137	51,908	-51,908
6.343,429	51,720	-51,720
6.363,722	51,529	-51,529
6.384,013	51,334	-51,334
6.404,305	51,136	-51,136
6.424,597	50,935	-50,935
6.444,889	50,731	-50,731
6.465,181	50,524	-50,524
6.485,472	50,313	-50,313
6.505,763	50,098	-50,098
6.526,054	49,881	-49,881

Distância (m)	Largura (m)	Largura negativa (m)
6.546,346	49,660	-49,660
6.566,637	49,435	-49,435
6.586,928	49,207	-49,207
6.607,218	48,975	-48,975
6.627,509	48,739	-48,739
6.647,800	48,500	-48,500
6.668,091	48,257	-48,257
6.688,381	48,010	-48,010
6.708,671	47,759	-47,759
6.728,962	47,504	-47,504
6.749,252	47,245	-47,245
6.769,542	46,982	-46,982
6.789,832	46,714	-46,714
6.810,122	46,443	-46,443
6.830,412	46,167	-46,167
6.850,701	45,886	-45,886
6.870,991	45,602	-45,602

Tabela 57 – Dados para construção da nuvem isocêntrica referente à liberação instantânea (*puff*) ao nível do solo para a classe de estabilidade “F”

(continuação)

Distância (m)	Largura (m)	Largura negativa (m)
6.891,280	45,312	-45,312
6.911,570	45,018	-45,018
6.931,859	44,719	-44,719
6.952,148	44,415	-44,415
6.972,438	44,106	-44,106
6.992,727	43,791	-43,791
7.013,015	43,472	-43,472
7.033,304	43,147	-43,147
7.053,593	42,817	-42,817
7.073,882	42,481	-42,481
7.094,170	42,140	-42,140
7.114,459	41,792	-41,792
7.134,747	41,439	-41,439
7.155,036	41,079	-41,079
7.175,324	40,713	-40,713
7.195,612	40,341	-40,341
7.215,900	39,961	-39,961

Distância (m)	Largura (m)	Largura negativa (m)
7.236,188	39,575	-39,575
7.256,476	39,182	-39,182
7.276,764	38,781	-38,781
7.297,051	38,373	-38,373
7.317,339	37,956	-37,956
7.337,626	37,532	-37,532
7.357,914	37,100	-37,100
7.378,201	36,658	-36,658
7.398,489	36,208	-36,208
7.418,776	35,748	-35,748
7.439,063	35,279	-35,279
7.459,350	34,799	-34,799
7.479,637	34,309	-34,309
7.499,924	33,808	-33,808
7.520,210	33,295	-33,295
7.540,497	32,771	-32,771
7.560,783	32,233	-32,233

Tabela 57 – Dados para construção da nuvem isocêntrica referente à liberação instantânea (*puff*) ao nível do solo para a classe de estabilidade “F”  
(conclusão)

Distância (m)	Largura (m)	Largura negativa (m)
7.581,070	-31,683	-31,683
7.601,356	-31,118	-31,118
7.621,643	-30,539	-30,539
7.641,929	-29,944	-29,944
7.662,215	-29,332	-29,332
7.682,501	-28,703	-28,703
7.702,787	-28,055	-28,055
7.723,073	-27,386	-27,386
7.743,359	-26,696	-26,696
7.763,645	-25,983	-25,983
7.783,930	-25,244	-25,244
7.804,216	-24,477	-24,477
7.824,501	-23,680	-23,680
7.844,786	-22,849	-22,849
7.865,072	-21,980	-21,980
7.885,357	-21,070	-21,070

Distância (m)	Largura (m)	Largura negativa (m)
7.905,643	-20,112	-20,112
7.925,927	19,098	-19,098
7.946,212	18,021	-18,021
7.966,497	16,866	-16,866
7.986,782	15,618	-15,618
8.007,067	14,252	-14,252
8.027,352	12,729	-12,729
8.047,636	10,985	-10,985
8.067,921	8,891	-8,891
8.088,206	6,095	-6,095

Fonte: Autora

Tabela 58 – Dados para construção da nuvem isocêntrica referente à liberação instantânea (*puff*) a 4 metros do nível do solo para a classe de estabilidade “A”

(continua)

Distância (m)	Largura (m)	Largura negativa (m)
1,000	0	0
21,000	11,483	- 11,483
41,000	18,654	- 18,654
61,000	24,574	- 24,574
81,000	29,666	- 29,666
101,000	34,133	- 34,133
121,000	38,096	- 38,096
141,000	41,634	- 41,634
161,000	44,805	- 44,805
181,000	47,652	- 47,652
201,000	50,210	- 50,210
221,000	52,507	- 52,507
241,000	54,566	- 54,567
261,000	56,407	- 56,408
281,000	58,048	- 58,048
301,000	59,502	- 59,502

Distância (m)	Largura (m)	Largura negativa (m)
321,000	60,783	- 60,783
341,000	61,904	- 61,904
361,000	62,875	- 62,875
381,000	63,705	- 63,705
401,000	64,404	- 64,404
421,000	64,980	- 64,980
441,000	65,440	- 65,440
461,000	65,791	- 65,791
481,000	66,041	- 66,041
501,000	66,194	- 66,194
521,000	66,256	- 66,256
541,000	66,233	- 66,233
561,000	66,130	- 66,130
581,000	65,952	- 65,952
601,000	65,701	- 65,701
621,000	65,383	- 65,383

Tabela 58 – Dados para construção da nuvem isocêntrica referente à liberação instantânea (*puff*) a 4 metros do nível do solo para a classe de estabilidade “A”

(continuação)

Distância (m)	Largura (m)	Largura negativa (m)
641,000	65,002	-65,002
661,000	64,560	-64,56
681,000	64,0621	-64,062
701,000	63,5102	-63,51
721,000	62,9077	-62,908
741,000	62,2574	-62,257
761,000	61,5617	-61,562
781,000	60,8233	-60,823
801,000	60,0443	-60,044
821,000	59,2271	-59,227
841,000	58,3736	-58,374
861,000	57,4857	-57,486
881,000	56,5653	-56,565
901,000	55,6141	-55,614
921,000	54,6337	-54,634
941,000	53,6256	-53,626

Distância (m)	Largura (m)	Largura negativa (m)
981,000	51,5319	-51,532
1.001,000	50,449	-50,449
1.021,000	49,344	-49,344
1.041,000	48,217	-48,217
1.061,000	47,070	-47,070
1.081,000	45,904	-45,904
1.101,000	44,719	-44,719
1.121,000	43,517	-43,517
1.141,000	42,299	-42,299
1.161,000	41,064	-41,064
1.181,000	39,815	-39,815
1.201,000	38,551	-38,551
1.221,000	37,274	-37,274
1.241,000	35,984	-35,984
1.261,000	34,681	-34,681
1.281,000	33,367	-33,367

Tabela 58 – Dados para construção da nuvem isocêntrica referente à liberação instantânea (puff) a 4 metros do nível do solo para a classe de estabilidade “A”

(conclusão)

Distância (m)	Largura (m)	Largura negativa (m)
1.321,000	30,705	-30,705
1.341,000	29,358	-29,358
1.361,000	28,0012	-28,001
1.381,000	26,6352	-26,635
1.401,000	25,2602	-25,26
1.421,000	23,8767	-23,877
1.441,000	22,4849	-22,485
1.461,000	21,0853	-21,085
1.481,000	19,6782	-19,678
1.501,000	18,2638	-18,264
1.521,000	16,8425	-16,843
1.541,000	15,4147	-15,415
1.561,000	13,9804	-13,98
1.581,000	12,5401	-12,54
1.601,000	11,094	-11,094

Distância (m)	Largura (m)	Largura negativa (m)
1.621,000	9,64221	-9,6422
1.641,000	8,18507	-8,1851
1.661,000	6,72276	-6,7228
1.681,000	5,25548	-5,2555
1.701,000	3,78344	-3,7834
1.721,000	2,3068	-2,3068
1.741,000	0,82576	-0,8258

Fonte: Autora



Tabela 59 – Dados para construção da nuvem isocêntrica referente à liberação instantânea (*puff*) a 4 metros do nível do solo para a classe de estabilidade “D”

(continua)

Distância (m)	Largura (m)	Largura negativa (m)
1,000	0,000	0,000
21,000	4,907	- 4,907
41,000	7,819	- 7,819
61,000	11,045	- 11,045
81,000	13,955	- 13,955
101,000	16,665	- 16,665
121,000	19,218	- 19,218
141,000	21,643	- 21,643
161,000	23,961	- 23,961
181,000	26,183	- 26,183
201,000	28,323	- 28,323
221,000	30,387	- 30,387
241,000	32,382	- 32,382
261,000	34,315	- 34,315
281,000	36,190	- 36,190
301,000	38,010	- 38,010

Distância (m)	Largura (m)	Largura negativa (m)
321,000	39,780	- 39,780
341,000	41,501	- 41,501
361,000	43,178	- 43,178
381,000	44,811	- 44,811
401,000	46,404	- 46,404
421,000	47,958	- 47,958
441,000	49,474	- 49,474
461,000	50,955	- 50,955
481,000	52,401	- 52,401
501,000	53,813	- 53,813
521,000	55,194	- 55,194
541,000	56,544	- 56,544
561,000	57,863	- 57,863
581,000	59,153	- 59,153
601,000	60,415	- 60,415
621,000	61,649	- 61,649

Tabela 59 – Dados para construção da nuvem isocêntrica referente à liberação instantânea (*puff*) a 4 metros do nível do solo para a classe de estabilidade “D”

(continuação)

Distância (m)	Largura (m)	Largura negativa (m)
641,000	62,857	-62,857
661,000	64,038	-64,038
681,000	65,193	-65,193
701,000	66,324	-66,324
721,000	67,430	-67,430
741,000	68,512	-68,512
761,000	69,571	-69,571
781,000	70,607	-70,607
801,000	71,620	-71,620
821,000	72,611	-72,611
841,000	73,580	-73,580
861,000	74,528	-74,528
881,000	75,455	-75,455
901,000	76,361	-76,361
921,000	77,246	-77,246
941,000	78,112	-78,112

Distância (m)	Largura (m)	Largura negativa (m)
981,000	79,784	-79,784
1.001,000	80,591	-80,591
1.021,000	81,379	-81,379
1.041,000	82,148	-82,148
1.061,000	82,898	-82,898
1.081,000	83,630	-83,630
1.101,000	84,344	-84,344
1.121,000	85,040	-85,040
1.141,000	85,718	-85,718
1.161,000	86,379	-86,379
1.181,000	87,022	-87,022
1201,000	87,647	-87,647
1.221,000	88,256	-88,256
1.241,000	88,848	-88,848
1.261,000	89,422	-89,422
1.281,000	89,980	-89,980

Tabela 59 – Dados para construção da nuvem isocêntrica referente à liberação instantânea (*puff*) a 4 metros do nível do solo para a classe de estabilidade “D”

(continuação)

Distância (m)	Largura (m)	Largura negativa (m)
1.301,000	90,522	-90,522
1.321,000	91,047	-91,047
1.341,000	91,556	-91,556
1.361,000	92,048	-92,048
1.381,000	92,524	-92,524
1.401,000	92,984	-92,984
1.421,000	93,429	-93,429
1.441,000	93,857	-93,857
1.461,000	94,270	-94,270
1.481,000	94,667	-94,667
1.501,000	95,049	-95,049
1.521,000	95,415	-95,415
1.541,000	95,765	-95,765
1.561,000	96,100	-96,100
1.581,000	96,420	-96,420
1.601,000	96,725	-96,725

Distância (m)	Largura (m)	Largura negativa (m)
1.621,000	97,014	-97,014
1.641,000	97,289	-97,289
1.661,000	97,548	-97,548
1.681,000	97,792	-97,792
1.701,000	98,021	-98,021
1.721,000	98,236	-98,236
1.741,000	98,435	-98,435
1.761,000	98,620	-98,620
1.781,000	98,790	-98,790
1.801,000	98,945	-98,945
1.821,000	99,085	-99,085
1.841,000	99,211	-99,211
1.861,000	99,321	-99,321
1.881,000	99,418	-99,418
1.901,000	99,499	-99,499
1.921,000	99,566	-99,566

Tabela 59 – Dados para construção da nuvem isocêntrica referente à liberação instantânea (*puff*) a 4 metros do nível do solo para a classe de estabilidade “D”

(continuação)

Distância (m)	Largura (m)	Largura negativa (m)
1.941,000	99,618	-99,618
1.961,000	99,656	-99,656
1.981,000	99,679	-99,679
2.001,000	99,687	-99,687
2.021,000	99,681	-99,681
2.041,000	99,660	-99,660
2.061,000	99,625	-99,625
2.081,000	99,575	-99,575
2.101,000	99,511	-99,511
2.121,000	99,432	-99,432
2.141,000	99,338	-99,338
2.161,000	99,230	-99,230
2.181,000	99,107	-99,107
2.201,000	98,970	-98,970
2.221,000	98,818	-98,818
2.241,000	98,651	-98,651

Distância (m)	Largura (m)	Largura negativa (m)
2.261,000	98,470	-98,470
2.281,000	98,274	-98,274
2.301,000	98,064	-98,064
2.321,000	97,838	-97,838
2.341,000	97,598	-97,598
2.361,000	97,344	-97,344
2.381,000	97,074	-97,074
2.401,000	96,790	-96,790
2.421,000	96,490	-96,490
2.441,000	96,176	-96,176
2.461,000	95,847	-95,847
2.481,000	95,503	-95,503
2.501,000	95,145	-95,145
2.521,000	94,771	-94,771
2.541,000	94,382	-94,382
2.561,000	93,978	-93,978

Tabela 59 – Dados para construção da nuvem isocêntrica referente à liberação instantânea (*puff*) a 4 metros do nível do solo para a classe de estabilidade “D”

(continuação)

Distância (m)	Largura (m)	Largura negativa (m)
2.581,000	93,559	-93,559
2.601,000	93,124	-93,124
2.621,000	92,675	-92,675
2.641,000	92,210	-92,210
2.661,000	91,730	-91,730
2.681,000	91,234	-91,234
2.701,000	90,724	-90,724
2.721,000	90,197	-90,197
2.741,000	89,655	-89,655
2.761,000	89,098	-89,098
2.781,000	88,525	-88,525
2.801,000	87,936	-87,936
2.821,000	87,332	-87,332
2.841,000	86,711	-86,711
2.861,000	86,075	-86,075
2.881,000	85,423	-85,423

Distância (m)	Largura (m)	Largura negativa (m)
2.901,000	84,755	-84,755
2.921,000	84,071	-84,071
2.941,000	83,371	-83,371
2.961,000	82,654	-82,654
2.981,000	81,922	-81,922
3.001,000	81,173	-81,173
3.021,000	80,407	-80,407
3.041,000	79,625	-79,625
3.061,000	78,827	-78,827
3.081,000	78,012	-78,012
3.101,000	77,180	-77,180
3.121,000	76,331	-76,331
3.141,000	75,466	-75,466
3.161,000	74,583	-74,583
3.181,000	73,684	-73,684
3.201,000	72,767	-72,767

Tabela 59 – Dados para construção da nuvem isocêntrica referente à liberação instantânea (*puff*) a 4 metros do nível do solo para a classe de estabilidade “D”

(continuação)

Distância (m)	Largura (m)	Largura negativa (m)
3.221,000	71,834	-71,834
3.241,000	70,883	-70,883
3.261,000	69,914	-69,914
3.281,000	68,929	-68,929
3.301,000	67,925	-67,925
3.321,000	66,904	-66,904
3.341,000	65,866	-65,866
3.361,000	64,809	-64,809
3.381,000	63,735	-63,735
3.401,000	62,643	-62,643
3.421,000	61,533	-61,533
3.441,000	60,404	-60,404
3.461,000	59,258	-59,258
3.481,000	58,093	-58,093
3.501,000	56,909	-56,909
3.521,000	55,708	-55,708

Distância (m)	Largura (m)	Largura negativa (m)
3.541,000	54,487	-54,487
3.561,000	53,248	-53,248
3.581,000	51,990	-51,990
3.601,000	50,713	-50,713
3.621,000	49,418	-49,418
3.641,000	48,103	-48,103
3.661,000	46,769	-46,769
3.681,000	45,416	-45,416
3.701,000	44,043	-44,043
3.721,000	42,652	-42,652
3.741,000	41,240	-41,240
3.761,000	39,809	-39,809
3.781,000	38,359	-38,359
3.801,000	36,888	-36,888
3.821,000	35,398	-35,398
3.841,000	33,888	-33,888

Tabela 59 – Dados para construção da nuvem isocêntrica referente à liberação instantânea (*puff*) a 4 metros do nível do solo para a classe de estabilidade “D”

(conclusão)

Distância (m)	Largura (m)	Largura negativa (m)
3.861,000	32,358	-32,358
3.881,000	30,808	-30,808
3.901,000	29,237	-29,237
3.921,000	27,647	-27,647
3.941,000	26,036	-26,036
3.961,000	24,405	-24,405
3.981,000	22,753	-22,753
4.001,000	21,081	-21,081
4.021,000	19,388	-19,388
4.041,000	17,674	-17,674
4.061,000	15,940	-15,940
4.081,000	14,185	-14,185
4.101,000	12,409	-12,409
4.121,000	10,612	-10,612
4.141,000	8,794	-8,794

Fonte: Autora

Distância (m)	Largura (m)	Largura negativa (m)
4.161,000	6,955	-6,955
4.181,000	5,095	-5,095
4.201,000	3,214	-3,214
4.221,000	1,312	-1,312

Tabela 60 – Dados para construção da nuvem isocêntrica referente à liberação instantânea (*puff*) a 4 metros do nível do solo para a classe de estabilidade “F”

(continua)

Distância (m)	Largura (m)	Largura negativa (m)
1,000	1,000	- 1,000
101,000	1,000	- 1,000
201,000	7,831	- 7,831
301,000	12,051	- 12,051
401,000	15,772	- 15,772
501,000	19,189	- 19,189
601,000	22,384	- 22,384
701,000	25,406	- 25,406
801,000	28,283	- 28,283
901,000	31,038	- 31,038
1.001,000	33,685	- 33,685
1.101,000	36,238	- 36,238
1.201,000	38,705	- 38,705
1.301,000	41,095	- 41,095
1.401,000	43,414	- 43,414
1.501,000	45,667	- 45,667

Distância (m)	Largura (m)	Largura negativa (m)
1.601,000	47,859	- 47,859
1.701,000	49,993	- 49,993
1.801,000	52,074	- 52,074
1.901,000	54,105	- 54,105
2.001,000	56,088	- 56,088
2.101,000	58,025	- 58,025
2.201,000	59,919	- 59,919
2.301,000	61,771	- 61,771
2.401,000	63,584	- 63,584
2.501,000	65,359	- 65,359
2.601,000	67,097	- 67,097
2.701,000	68,801	- 68,801
2.801,000	70,470	- 70,470
2.901,000	72,106	- 72,106
3.001,000	73,711	- 73,711
3.101,000	75,285	- 75,285



Tabela 60 – Dados para construção da nuvem isocêntrica referente à liberação instantânea (*puff*) a 4 metros do nível do solo para a classe de estabilidade “F”

(continuação)

Distância (m)	Largura (m)	Largura negativa (m)
3.201,000	76,829	- 76,829
3.301,000	78,344	- 78,344
3.401,000	79,831	- 79,831
3.501,000	81,290	- 81,290
3.601,000	82,723	- 82,723
3.701,000	84,129	- 84,129
3.801,000	85,510	- 85,510
3.901,000	86,866	- 86,866
4.001,000	88,197	- 88,197
4.101,000	89,505	- 89,505
4.201,000	90,789	- 90,789
4.301,000	92,050	- 92,050
4.401,000	93,289	- 93,289
4.501,000	94,506	- 94,506
4.601,000	95,700	- 95,700
4.701,000	96,874	- 96,874

Distância (m)	Largura (m)	Largura negativa (m)
4.801,000	98,026	-98,026
4.901,000	99,158	-99,158
5.001,000	100,270	-100,270
5.101,000	101,362	-101,362
5.201,000	102,433	-102,433
5.301,000	103,486	-103,486
5.401,000	104,519	-104,519
5.501,000	105,534	-105,534
5.601,000	106,529	-106,529
5.701,000	107,506	-107,506
5.801,000	108,465	-108,465
5.901,000	109,406	-109,406
6.001,000	110,329	-110,329
6.101,000	111,235	-111,235
6.201,000	112,123	-112,123
6.301,000	112,994	-112,994

Tabela 60 – Dados para construção da nuvem isocêntrica referente à liberação instantânea (*puff*) a 4 metros do nível do solo para a classe de estabilidade “F”

(continuação)

Distância (m)	Largura (m)	Largura negativa (m)
6.401,000	113,847	-113,847
6.501,000	114,684	-114,684
6.601,000	115,504	-115,504
6.701,000	116,308	-116,308
6.801,000	117,095	-117,095
6.901,000	117,866	-117,866
7.001,000	118,620	-118,620
7.101,000	119,359	-119,359
7.201,000	120,081	-120,081
7.301,000	120,788	-120,788
7.401,000	121,478	-121,478
7.501,000	122,154	-122,154
7.601,000	122,813	-122,813
7.701,000	123,458	-123,458
7.801,000	124,087	-124,087
7.901,000	124,701	-124,701

Distância (m)	Largura (m)	Largura negativa (m)
8.001,000	125,299	-125,299
8.101,000	125,883	-125,883
8.201,000	126,451	-126,451
8.301,000	127,005	-127,005
8.401,000	127,543	-127,543
8.501,000	128,067	-128,067
8.601,000	128,576	-128,576
8.701,000	129,071	-129,071
8.801,000	129,550	-129,550
8.901,000	130,016	-130,016
9.001,000	130,466	-130,466
9.101,000	130,903	-130,903
9.201,000	131,324	-131,324
9.301,000	131,732	-131,732
9.401,000	132,124	-132,124
9.501,000	132,503	-132,503

Tabela 60 – Dados para construção da nuvem isocêntrica referente à liberação instantânea (*puff*) a 4 metros do nível do solo para a classe de estabilidade “F”

(continuação)

Distância (m)	Largura (m)	Largura negativa (m)
9.601,000	132,867	-132,867
9.701,000	133,217	-133,217
9.801,000	133,553	-133,553
9.901,000	133,874	-133,874
10.001,000	134,181	-134,181
10.101,000	134,474	-134,474
10.201,000	134,753	-134,753
10.301,000	135,017	-135,017
10.401,000	135,267	-135,267
10.501,000	135,503	-135,503
10.601,000	135,725	-135,725
10.701,000	135,933	-135,933
10.801,000	136,126	-136,126
10.901,000	136,305	-136,305
11.001,000	136,470	-136,470
11.101,000	136,621	-136,621

Distância (m)	Largura (m)	Largura negativa (m)
11.201,000	136,757	-136,757
11.301,000	136,879	-136,879
11.401,000	136,987	-136,987
11.501,000	137,080	-137,080
11.601,000	137,159	-137,159
11.701,000	137,224	-137,224
11.801,000	137,274	-137,274
11.901,000	137,310	-137,310
12.001,000	137,331	-137,331
12.101,000	137,337	-137,337
12.201,000	137,329	-137,329
12.301,000	137,307	-137,307
12.401,000	137,269	-137,269
12.501,000	137,217	-137,217
12.601,000	137,150	-137,150
12.701,000	137,068	-137,068

Tabela 60 – Dados para construção da nuvem isocêntrica referente à liberação instantânea (*puff*) a 4 metros do nível do solo para a classe de estabilidade “F”

(continuação)

Distância (m)	Largura (m)	Largura negativa (m)
12.801,000	136,971	-136,971
12.901,000	136,860	-136,860
13.001,000	136,733	-136,733
13.101,000	136,591	-136,591
13.201,000	136,433	-136,433
13.301,000	136,261	-136,261
13.401,000	136,072	-136,072
13.501,000	135,869	-135,869
13.601,000	135,649	-135,649
13.701,000	135,415	-135,415
13.801,000	135,164	-135,164
13.901,000	134,897	-134,897
14.001,000	134,614	-134,614
14.101,000	134,316	-134,316
14.201,000	134,000	-134,000
14.301,000	133,669	-133,669

Distância (m)	Largura (m)	Largura negativa (m)
14.401,000	133,320	-133,320
14.501,000	132,956	-132,956
14.601,000	132,574	-132,574
14.701,000	132,176	-132,176
14.801,000	131,760	-131,760
14.901,000	131,327	-131,327
15.001,000	130,876	-130,876
15.101,000	130,409	-130,409
15.201,000	129,923	-129,923
15.301,000	129,419	-129,419
15.401,000	128,897	-128,897
15.501,000	128,357	-128,357
15.601,000	127,798	-127,798
15.701,000	127,221	-127,221
15.801,000	126,624	-126,624
15.901,000	126,008	-126,008

Tabela 60 – Dados para construção da nuvem isocêntrica referente à liberação instantânea (*puff*) a 4 metros do nível do solo para a classe de estabilidade “F”

(continuação)

Distância (m)	Largura (m)	Largura negativa (m)
16.001	125,373	-125,373
16.101,000	124,718	-124,718
16.201,000	124,043	-124,043
16.301,000	123,348	-123,348
16.401,000	122,632	-122,632
16.501,000	121,896	-121,896
16.601,000	121,138	-121,138
16.701,000	120,359	-120,359
16.801,000	119,558	-119,558
16.901,000	118,735	-118,735
17.001,000	117,889	-117,889
17.101,000	117,022	-117,022
17.201,000	116,130	-116,130
17.301,000	115,216	-115,216
17.401,000	114,276	-114,276
17.501,000	113,313	-113,313

Distância (m)	Largura (m)	Largura negativa (m)
17.601,000	112,325	-112,325
17.701,000	111,312	-111,312
17.801,000	110,272	-110,272
17.901,000	109,207	-109,207
18.001,000	108,115	-108,115
18.101,000	106,995	-106,995
18.201,000	105,847	-105,847
18.301,000	104,671	-104,671
18.401,000	103,465	-103,465
18.501,000	102,230	-102,230
18.601,000	100,964	-100,964
18.701,000	99,666	-99,666
18.801,000	98,337	-98,337
18.901,000	96,975	-96,975
19.001,000	95,579	-95,579
19.101,000	94,148	-94,148

Tabela 60 – Dados para construção da nuvem isocêntrica referente à liberação instantânea (*puff*) a 4 metros do nível do solo para a classe de estabilidade “F”

(continuação)

Distância (m)	Largura (m)	Largura negativa (m)
19.201,000	92,682	-92,682
19.301,000	91,180	-91,180
19.401,000	89,640	-89,640
19.501,000	88,061	-88,061
19.601,000	86,443	-86,443
19.701,000	84,784	-84,784
19.801,000	83,083	-83,083
19.901,000	81,338	-81,338
20.001,000	79,549	-79,549
20.101,000	77,713	-77,713
20.201,000	75,829	-75,829
20.301,000	73,895	-73,895
20.401,000	71,910	-71,910
20.501,000	69,871	-69,871
20.601,000	67,778	-67,778
20.701,000	65,626	-65,626

Distância (m)	Largura (m)	Largura negativa (m)
20.801	63,415	-63,415
20.901,000	61,142	-61,142
21.001,000	58,804	-58,804
21.101,000	56,398	-56,398
21.201,000	53,922	-53,922
21.301,000	51,372	-51,372
21.401,000	48,745	-48,745
21.501,000	46,038	-46,038
21.601,000	43,245	-43,245
21.701,000	40,364	-40,364
21.801,000	37,389	-37,389
21.901,000	34,315	-34,315
22.001,000	31,138	-31,138
22.101,000	27,852	-27,852
22.201,000	24,449	-24,449
22.301,000	20,924	-20,924

Tabela 60 – Dados para construção da nuvem isocêntrica referente à liberação instantânea (*puff*) a 4 metros do nível do solo para a classe de estabilidade “F”

(conclusão)

Distância (m)	Largura (m)	Largura negativa (m)
22.401,000	17,270	-17,270
22.501,000	13,477	-13,477
22.601,000	9,538	-9,538
22.701,000	5,443	-5,443
22.801,000	1,183	-1,183

Fonte: Autora

Tabela 61 – Dados para construção da nuvem isocêntrica referente à liberação contínua (pluma) ao nível do solo para a classe de estabilidade “A”

Distância (m)	Largura (m)	Largura negativa (m)
1,000	1,319	- 1,319
21,000	14,235	- 14,235
41,000	20,235	- 20,235
61,000	23,278	- 23,278
81,000	24,443	- 24,443
101,000	24,337	- 24,337
121,000	23,345	- 23,345
141,000	21,719	- 21,719
161,000	19,631	- 19,631
181,000	17,198	- 17,198
201,000	14,505	- 14,505
221,000	11,610	- 11,610
241,000	8,557	- 8,557
261,000	5,379	- 5,379
281,000	2,100	- 2,100
291,000	0,429	- 0,429

Fonte: Autora



Tabela 62 – Dados para construção da nuvem isocêntrica referente à liberação contínua (pluma) ao nível do solo para a classe de estabilidade “D”

Distância (m)	Largura (m)	Largura negativa (m)
1,000	0,711	- 0,711
21,000	9,143	- 9,143
41,000	13,985	- 13,985
61,000	17,447	- 17,447
81,000	19,929	- 19,929
101,000	21,658	- 21,658
121,000	22,785	- 22,785
141,000	23,420	- 23,420
161,000	23,650	- 23,650
181,000	23,540	- 23,540
201,000	23,146	- 23,146
221,000	22,511	- 22,511
241,000	21,672	- 21,672
261,000	20,658	- 20,658
281,000	19,494	- 19,494
301,000	18,202	- 18,202

Distância (m)	Largura (m)	Largura negativa (m)
321,000	16,797	- 16,797
341,000	15,296	- 15,296
361,000	13,710	- 13,710
381,000	12,049	- 12,049
401,000	10,323	- 10,323
421,000	8,539	- 8,539
441,000	6,704	- 6,704
461,000	4,824	- 4,824
481,000	2,902	- 2,902
501,000	0,945	- 0,945

Fonte: Autora

Tabela 63 – Dados para construção da nuvem isocêntrica referente à liberação contínua (pluma) ao nível do solo para a classe de estabilidade “F”

(continua)

Distância (m)	Largura (m)	Largura negativa (m)
1,000	0,510	- 0,510
21,000	7,063	- 7,063
41,000	11,591	- 11,591
61,000	15,086	- 15,086
81,000	17,963	- 17,963
101,000	20,349	- 20,349
121,000	22,328	- 22,328
141,000	23,957	- 23,957
161,000	25,282	- 25,282
181,000	26,338	- 26,338
201,000	27,154	- 27,154
221,000	27,754	- 27,754
241,000	28,159	- 28,159
261,000	28,387	- 28,387
281,000	28,454	- 28,454
301,000	28,372	- 28,372
321,000	28,155	- 28,155

Distância (m)	Largura (m)	Largura negativa (m)
341,000	27,813	- 27,813
361,000	27,357	- 27,357
381,000	26,795	- 26,795
401,000	26,135	- 26,135
421,000	25,384	- 25,384
441,000	24,549	- 24,549
461,000	23,637	- 23,637
481,000	22,652	- 22,652
501,000	21,599	- 21,599
521,000	20,484	- 20,484
541,000	19,310	- 19,310
561,000	18,082	- 18,082
581,000	16,802	- 16,802
601,000	15,474	- 15,474
621,000	14,102	- 14,102
641,000	12,688	- 12,688
661,000	11,234	- 11,234

Tabela 63 – Dados para construção da nuvem isocêntrica referente à liberação contínua (pluma) ao nível do solo para a classe de estabilidade “F”  
(conclusão)

Distância (m)	Largura (m)	Largura negativa (m)
681,000	9,743	- 9,743
701,000	8,218	- 8,218
721,000	6,660	- 6,660
741,000	5,071	- 5,071
761,000	3,452	- 3,452
781,000	1,807	- 1,807
801,000	0,137	- 0,137

Fonte: Autora

Tabela 64 – Dados para construção da nuvem isocêntrica referente à liberação contínua (pluma) a 4 metros do nível do solo para a classe de estabilidade “A”

Distância (m)	Largura (m)	Largura negativa (m)
1,000	0,000	0,000
21,000	12,545	- 12,545
41,000	18,104	- 18,104
61,000	20,799	- 20,799
81,000	21,870	- 21,870
101,000	21,926	- 21,926
121,000	21,311	- 21,311
141,000	20,238	- 20,238
161,000	18,840	- 18,840
181,000	17,207	- 17,207
201,000	15,397	- 15,397
221,000	13,454	- 13,454
241,000	11,407	- 11,407
261,000	9,277	- 9,277
281,000	7,081	- 7,081
301,000	4,832	- 4,832

Distância (m)	Largura (m)	Largura negativa (m)
321,000	2,538	- 2,538
341,000	0,208	- 0,208

Fonte: Autora

Tabela 65 – Dados para construção da nuvem isocêntrica referente à liberação contínua (pluma) a 4 metros do nível do solo para a classe de estabilidade “D”

Distância (m)	Largura (m)	Largura negativa (m)
1,000	0,000	0,000
21,000	7,922	- 7,922
41,000	13,396	- 13,396
61,000	17,146	- 17,146
81,000	19,806	- 19,806
101,000	21,649	- 21,649
121,000	22,838	- 22,838
141,000	23,491	- 23,491
161,000	23,697	- 23,697
181,000	23,525	- 23,525
201,000	23,033	- 23,033
221,000	22,267	- 22,267
241,000	21,267	- 21,267
261,000	20,064	- 20,064
281,000	18,688	- 18,688
301,000	17,159	- 17,159

Distância (m)	Largura (m)	Largura negativa (m)
321,000	15,499	- 15,499
341,000	13,724	- 13,724
361,000	11,847	- 11,847
381,000	9,882	- 9,882
401,000	7,838	- 7,838
421,000	5,725	- 5,725
441,000	3,551	- 3,551
461,000	1,321	- 1,321

Fonte: Autora

Tabela 66 – Dados para construção da nuvem isocêntrica referente à liberação contínua (pluma) a 4 metros do nível do solo para a classe de estabilidade “F”

Distância (m)	Largura (m)	Largura negativa (m)
1,000	0,000	0,000
21,000	4,852	- 4,852
41,000	10,789	- 10,789
61,000	14,952	- 14,952
81,000	18,293	- 18,293
101,000	21,041	- 21,041
121,000	23,309	- 23,309
141,000	25,163	- 25,163
161,000	26,652	- 26,652
181,000	27,810	- 27,810
201,000	28,664	- 28,664
221,000	29,237	- 29,237
241,000	29,546	- 29,546
261,000	29,608	- 29,608
281,000	29,436	- 29,436
301,000	29,042	- 29,042

Distância (m)	Largura (m)	Largura negativa (m)
321,000	28,437	- 28,437
341,000	27,631	- 27,631
361,000	26,632	- 26,632
381,000	25,449	- 25,449
401,000	24,090	- 24,090
421,000	22,562	- 22,562
441,000	20,871	- 20,871
461,000	19,026	- 19,026
481,000	17,031	- 17,031
501,000	14,893	- 14,893
521,000	12,619	- 12,619
541,000	10,213	- 10,213
561,000	7,682	- 7,682
581,000	5,030	- 5,030
601,000	2,264	- 2,264

Fonte: Autora