



Juliana Mello da Silva

**Avaliação de Modelos de Cálculo de
Consequência para Análises de Risco em
Oleodutos**

Projeto de Graduação

Projeto de Graduação apresentado ao Departamento de Engenharia Mecânica da PUC-Rio.

Orientador : Prof. Renato Bichara Vieira
Coorientador: Prof. Claudio Veloso Barreto

Rio de Janeiro
Dezembro de 2024

Agradecimentos

Aos meus pais e irmãos, pelo carinho e apoio incondicionais durante toda a minha trajetória.

Aos meus orientadores, prof. Claudio Veloso e prof. Renato Bichara, pelo constante estímulo ao interesse pela engenharia de dutos.

À PUC-Rio, pelos auxílios concedidos, sem os quais este trabalho não poderia ter sido realizado.

Ao meu amigo e colega de trabalho, Luiz Eduardo Carnevale, por todo apoio e orientação.

A todos os amigos e familiares que me apoiaram.

Resumo

Avaliação de Modelos de Cálculo de Consequência para Análises de Risco em Oleodutos.

O transporte dutoviário, em relação a outros modais, é o mais utilizado na indústria de óleo & gás por apresentar menor custo unitário por carga transportada, além de maior segurança e proteção ambiental, uma vez que a maioria de suas tubulações se encontram enterradas. Perante esse panorama, a gestão formal de risco em dutos torna-se uma parte essencial da indústria petrolífera, visto que as operações em dutos estão constantemente sujeitas a processos físicos e químicos que podem comprometer sua integridade,

O projeto tem por finalidade avaliar modelos de cálculo de consequência para análises de risco quantitativas em dutos de transporte, compreendendo diferentes cenários de falha em um oleoduto, que podem originar um incêndio e, conseqüentemente, causar fatalidades. Assim, antes de se obter o risco quantitativo total do duto em R\$/(km.ano), torna-se necessária uma estimativa dos danos sociais para serem somados às demais conseqüências consideradas em avaliações de risco. Ao se analisar as conseqüências da falha, a categorização do tamanho do orifício (ou tamanho do defeito) será determinante para o tipo da falha: (i) pequeno orifício com uma abertura de aproximadamente 5% do diâmetro da tubulação, (ii) furo com uma abertura de aproximadamente 20% do diâmetro da tubulação e (iii) ruptura total da tubulação. Dentre os tópicos analisados em cada cenário, destacam-se o cálculo de volume vazado total em oleodutos, o qual é estimado a partir da soma de duas parcelas: (a) volume vazado durante a operação até a detecção do vazamento e a parada do bombeamento, e (b) volume vazado associado ao perfil hidráulico do duto e posicionamento de válvulas, também conhecido como volume vazado máximo gravitacional. Para cada um dos cenários, serão avaliados os raios de contorno de radiação provenientes dos níveis de perda de contenção (perfuração, furo e ruptura) e suas respectivas dosagens de radiação, associadas à possibilidade de ignição do produto vazado. Conseqüentemente, será avaliado o impacto social associado às probabilidades de fatalidades em função da exposição térmica.

Palavras-chave

Modelos de consequência; análise de risco em dutos; volume vazado; Probit; número de fatalidades; dosagem térmica.

Abstract

Evaluation of Consequence Calculation Models for Risk Analysis in Pipelines.

Pipeline transportation, compared to other modes, is the most widely used in the oil & gas industry due to its lower unit cost per transported load, as well as greater safety and environmental protection, given that most of its pipelines are buried. In this context, formal risk management for pipelines becomes an essential part of the oil industry, as pipeline operations are constantly subject to physical and chemical processes that may compromise their integrity.

The purpose of this project is to evaluate consequence calculation models for quantitative risk analyses in transport pipelines, considering different failure scenarios in an oil pipeline that could result in a fire and, consequently, cause fatalities. Thus, before determining the total pipeline quantitative risk in R\$/(km.year), it is necessary to estimate the social damages to be added to the other consequences considered in risk assessments. When analyzing the consequences of failure, the categorization of the hole size (or defect size) will be decisive for the type of failure: (i) a small hole with an opening of approximately 5% of the pipeline diameter, (ii) a puncture with an opening of approximately 20% of the pipeline diameter, and (iii) a full pipeline rupture. Among the analyzed topics in each scenario, one key aspect is the calculation of the total spilled volume in oil pipelines, which is estimated as the sum of two components: (a) the volume spilled during operation until the leak is detected and pumping is stopped, and (b) the volume spilled associated with the pipeline's hydraulic profile and valve positioning, also known as the maximum gravitational spill volume. For each scenario, the radiation boundary radius resulting from the levels of loss of containment (pinhole, hole, and rupture) and their respective radiation doses will be evaluated, considering the potential ignition of the leaked product. Consequently, the social impact associated with the probabilities of fatalities as a function of thermal exposure will be assessed.

Keywords

Consequence models; pipeline risk analysis; spill volume; Probit; number of fatalities; thermal dose.

Sumário

1	Introdução	10
2	Revisão Bibliográfica	13
2.1	Frequência de Falha	13
2.1.1	Dimensionamento de Defeitos	14
2.2	Consequência de Falha	15
2.2.1	Classe de Locação	16
2.2.1.1	Classe de Locação (ASME 31.8)	16
2.2.2	Incêndio em Poça	17
2.3	Função Probit	19
3	Metodologia	21
3.1	Volume Vazado em Transferência	22
3.1.1	Volume Vazado em Transferência: Perfuração	22
3.1.2	Volume Vazado em Transferência: Furo	23
3.1.3	Volume Vazado em Transferência: Ruptura	23
3.2	Volume Vazado Gravitacional	24
3.3	Volume Vazado Total	27
3.4	Cálculo de Consequência e Danos Sociais em Oleodutos	28
3.5	Cálculo de Fatalidades	31
3.5.1	Número de Fatalidades: Função Probit	32
3.5.2	Raios de Fatalidade: $R_{1\%}$ e $R_{100\%}$	33
3.5.3	Densidade Populacional Média	35
4	Estudo de Caso: Resultados	36
4.1	Volumes Vazados	37
4.2	Fatalidades: Quantificação Populacional por Densidade e por Contagem de Habitações	40
4.2.1	Cálculo de Fatalidade por Funções Probit - Eisenberg <i>et al</i> e TSAO&Perry	40
4.2.2	Cálculo de Fatalidade por Aproximação Linear	45
5	Conclusões	49

Lista de figuras

Figura 2.1	Unidade de classe de locação - ASME B31.8 (2020) [1].	16
Figura 2.2	Modelo de um incêndio em poça (geometria circular) [2].	18
Figura 3.1	Valor de K para saídas de dutos [3].	22
Figura 3.2	Segmentos vaporizados à esquerda do vazamento [4].	25
Figura 3.3	Segmentos vaporizados à direita do vazamento [4].	26
Figura 3.4	Procedimentos de Cálculo de Volume Vazado Total.	27
Figura 3.5	Diâmetro de Poça <i>versus</i> Volume Vazado - Registros CONCAWE (2001-2018) [5].	31
Figura 3.6	Funções Probit.	33
Figura 3.7	Raios de 1% a 100% de probabilidade de fatalidade [6].	35
Figura 4.1	Volume vazado total para cada cenário de falha.	37
Figura 4.2	Perfuração: volumes vazados gravitacional, operacional e total.	38
Figura 4.3	Perfuração: vazão de transferência.	38
Figura 4.4	Furo: volumes vazados gravitacional, operacional e total.	38
Figura 4.5	Furo: vazão de transferência.	39
Figura 4.6	Ruptura: volumes vazados gravitacional, operacional e total.	39
Figura 4.7	Ruptura: vazão de transferência.	39
Figura 4.8	Distribuição da classe de locação conforme comprimento desenvolvido do duto.	40
Figura 4.9	Perfuração: cálculo de fatalidades por densidade utilizando funções Probit (Eisenberg e TSAO&Perry).	41
Figura 4.10	Perfuração: cálculo de fatalidades por contagem utilizando funções Probit (Eisenberg e TSAO&Perry).	41
Figura 4.11	Furo: cálculo de fatalidades por densidade utilizando funções Probit (Eisenberg e TSAO&Perry).	42
Figura 4.12	Furo: cálculo de fatalidades por contagem utilizando funções Probit (Eisenberg e TSAO&Perry).	42
Figura 4.13	Ruptura: cálculo de fatalidades por densidade utilizando funções Probit (Eisenberg e TSAO&Perry).	43
Figura 4.14	Ruptura: cálculo de fatalidades por contagem utilizando funções Probit (Eisenberg e TSAO&Perry).	43
Figura 4.15	Perfuração: cálculo de fatalidades utilizando aproximação linear.	45
Figura 4.16	Furo: cálculo de fatalidades utilizando aproximação linear.	46
Figura 4.17	Ruptura: cálculo de fatalidades utilizando aproximação linear.	46
Figura 4.18	Perfuração: comparativo entre função Probit (TSAO&Perry) e aproximação linear.	47
Figura 4.19	Furo: comparativo entre função Probit (TSAO&Perry) e aproximação linear.	47

Figura 4.20 Ruptura: comparativo entre função Probit (TSAO&Perry) e aproximação linear.

Lista de tabelas

Tabela 3.1	Emissividade dos Produtos para Incêndio em Poça (HSE) [7].	30
Tabela 3.2	Volume Vazado versus Área de poça - CONCAWE (2001-2018) [5].	30
Tabela 3.3	Modelos de funções probits para exposição à radiação térmica (HSE) [7].	32
Tabela 3.4	Densidade populacional média em função da classe de locação (ASME B31.8 e NBR 12712).	35
Tabela 4.1	Especificações do produto transportado e da operação.	36
Tabela 4.2	Dados de máxima fatalidade para cada cenário de falha	45

Lista de Abreviaturas

ANP – Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis

ASME – *The American Society of Mechanical Engineers*

CETESB – Companhia Ambiental do Estado de São Paulo

CFD – *Computational Fluid Dynamics*

CONCAWE – *Conservation of Clean Air and Water in Europe*

EGIG – *European Gas Pipeline Incident Data Group*

GLP – Gás Liquefeito de Petróleo

GNL – Gás Natural Liquefeito

HSE – *Health & Safe Executive*

IBGE – Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística

NBR – Normas Brasileiras Regulamentadoras

POF – *Probability of Failure*

RTDT – Regulamento Técnico de Dutos Terrestres

SG – *Fluid Specific Gravity*

SMYS – *Specified Minimum Yield Strength*

SVL – *Value of a Statistical Life*

TNO – *Netherlands Organization of Applied Scientific Research*

1

Introdução

A necessidade de transportar produtos combustíveis líquidos ou gasosos entre dois pontos, atendendo determinados critérios de volume e distância, cria um cenário oportuno para a implementação de um projeto de dutos, uma vez que, quando comparado a outros modais de transporte, apresenta-se como a alternativa econômica mais vantajosa, confiável e segura da contemporaneidade [8].

Contudo, apesar de todos os avanços em segurança operacional, desde o desenvolvimento de novas tecnologias até a aplicação de possíveis penalidades e sanções governamentais, a sociedade ainda se mostra bastante condescendente com os acidentes causados pela indústria de petróleo e gás no que tange o transporte de seus produtos. Por esse motivo, surge a necessidade de normas mais rigorosas e maiores demandas por segurança provinda de órgãos regulamentadores, uma vez que a indústria de dutos não deve apresentar um posicionamento passivo em relação à otimização operacional e à segurança de transporte [8].

Como já constatado, o transporte dutoviário, em relação a outros modais, é o mais utilizado na indústria de óleo & gás por apresentar menor custo unitário por carga transportada, além de maior segurança e proteção ambiental, uma vez que a maioria de suas tubulações encontram-se enterradas [8]. Perante esse panorama, a gestão formal de risco em dutos torna-se uma parte essencial da indústria petrolífera, visto que as operações em dutos estão constantemente sujeitas a processos físicos e químicos que podem comprometer sua integridade, proporcionando danos econômicos, sociais e ambientais.

Segundo a norma ASME B31.8S [9], o risco é o produto matemático da probabilidade e das consequências de eventos resultantes de uma falha. As ocorrências que conferem risco de falha a um duto, conforme norma ASME B31.8S [9], são: corrosão interna e externa, ação de terceiros; danos geológico-geotécnicos; mecanismos de trincamento; operações incorretas e falhas de projeto ou operação.

Por conseguinte, percebe-se que impacto da perda de contenção em dutos torna-se uma preocupação para operadores, prestadores de serviços e órgãos reguladores, exigindo, portanto, que metodologias de análise de risco

sejam constantemente reavaliadas e aprimoradas pela indústria. O projeto em vigência tem por finalidade avaliar modelos de cálculo de consequência para análises de risco quantitativas em oleodutos de transporte, compreendendo diferentes cenários de falha.

Um cenário de falha em um oleoduto pode originar um incêndio e, conseqüentemente, causar fatalidades nas regiões no entorno. Assim, visando obter o risco total do duto em R\$/(km.ano), a metodologia empregada objetiva estimar os danos sociais causados pela perda de contenção com ignição de produto inflamável, para serem incorporadas em avaliações de risco voltadas à análise de integridade de dutos.

Ao se analisar as consequências da falha e o risco operacional, a distribuição do tamanho do orifício (ou tamanho do defeito) será determinante para o tipo da falha: (i) perfuração com uma abertura de aproximadamente 5% do diâmetro da tubulação, (ii) furo com uma abertura de aproximadamente 20% do diâmetro da tubulação e (iii) ruptura total da tubulação [10].

Ademais, entre os tópicos analisados em cada cenário, destacam-se o cálculo de volume vazado total em oleodutos, o qual é estimado a partir da soma de duas parcelas: (a) volume vazado durante a operação até a detecção do vazamento e a parada do bombeamento, e (b) volume vazado associado ao perfil hidráulico do duto, também conhecido como volume vazado máximo gravitacional [4].

Para cada um dos cenários, serão avaliados os raios de contorno de radiação provenientes dos níveis de perda de contenção (perfuração, furo e ruptura) e suas respectivas dosagens de radiação térmica, associadas à possibilidade de ignição do produto vazado. Conseqüentemente, será avaliado o impacto social associado às probabilidades de fatalidades em função da exposição térmica.

Será realizado um estudo de caso a partir de um oleoduto transportador de etanol, cujas características geométricas e operacionais serão detalhadas em capítulos posteriores. Ademais, variáveis temporais como tempo de detecção do vazamento pelo operador também serão incorporadas ao estudo de caso.

Para cada cenário operacional, serão realizados cálculos de volume vazado em transferência para os diâmetros de falha de perfuração, furo e ruptura. Em seqüência, o volume vazado total por tipo de falha será calculado somando-se os valores de volumes vazados gravitacionais e os volumes vazados em transferência. Após a execução dos cálculos de volume vazado total, será empregado o modelo “Incêndio em Poça” [2] para os cenários de falha (perfuração, furo e ruptura), a fim de se obter o fluxo de calor emitido em relação a um ponto de interesse no entorno do gasoduto. Desse modo, por meio dos dados de dosagem

térmica coletados, serão avaliadas diferentes abordagens para a avaliação do número de fatalidades.

O presente estudo encontra-se organizado em cinco capítulos; o primeiro capítulo consiste desta introdução.

O segundo capítulo, “Revisão Bibliográfica”, expõe o conteúdo teórico dos volumes vazados de transferência e gravitacional para cada cenário de falha abordado, além de definir os conceitos de classe de locação, dosagem térmica e probabilidade de fatalidade.

O terceiro capítulo, “Metodologia”, descreve as etapas das simulações necessárias ao cálculo das consequências de falha e número de fatalidades a partir de duas abordagens: (i) uma função linear entre os raios de 1% e 100% de probabilidade fatalidades e (ii) distribuição normal de fatalidades usando funções Probit de Eisenberg *et al* [11] e Tsao&Perry [12].

O quarto capítulo, “Resultados e Discussões”, apresenta e pondera sobre os resultados das simulações, detalhando as características geométricas e operacionais do oleoduto selecionado. Por sua vez, expõe os principais pontos de cada modelo de cálculo, comparando-os entre si.

Por fim, o quinto capítulo, “Conclusões”, apresenta o material conclusivo do projeto, além de fornecer propostas de otimização para os modelos selecionados.

2

Revisão Bibliográfica

Neste capítulo serão apresentados conceitos acerca da engenharia dos dutos, além de enaltecer as principais normas e instituições que contemplam o mapeamento do risco em dutos. Esses conteúdos, uma vez apresentados, virão a ser abordados e discutidos nos equacionamentos e modelagens presentes no capítulo “Metodologia”.

Segundo critérios da norma internacional ASME B31.8S (2020) [9], para se determinar os riscos associados a um determinado gasoduto, é preciso levar em consideração os tipos de ameaças possíveis de se ocorrer e as frequências de sua atuação no duto exposto. Conhecer e mapear cada ameaça possível de ocorrer é fundamental para a gestão e monitoramento da integridade operacional de dutos.

2.1

Frequência de Falha

De acordo com W. Kent Muhlbauer [13], o conceito de probabilidade de falha (PoF, do inglês *probability of failure*.) em um gasoduto expressa a possibilidade de ocorrência de um evento futuro, a qual é fomentada por dados históricos geralmente armazenados na forma de estatísticas resumidas.

Em avaliações de risco, segundo Muhlbauer, a medição da PoF possui uma abordagem muito específica, visto que, independentemente da definição de "falha" utilizada, o defeito só ocorre quando há uma ameaça (exposição), as medidas preventivas são insuficientes (efetividade da mitigação) e há resistência insuficiente ao mecanismo de falha. Em suma, todos esses três fatores devem ocorrer para que a falha aconteça; sendo essa a metodologia mais adequada para medição da PoF.

No Brasil, a norma técnica CETESB P4.261 [10] indica a utilização dos dados da frequência de falhas apresentados pelo EGIG (2023) [14] para gasodutos e CONCAWE (2020) [5] para oleodutos, a fim de se executar o cálculo do risco em dutos. As publicações das instituições EGIG [14] e CONCAWE [5] fornecem, por meio de seus bancos de dados, registros históricos de frequências de falha associadas a cada ameaça em gasodutos e oleodutos, respectivamente, pertencentes às transportadoras que compõem as associações.

Segundo as publicações da instituição EGIG [14] (*European Gas Pipeline Incident Data Group*), a frequência de falha em gasodutos é calculada dividindo-se o número de incidentes pela exposição. O parâmetro de exposição, expresso em quilômetros-anos ($\text{km} \cdot \text{ano}$), é definido como sendo o comprimento do duto multiplicado pela sua duração de exposição a uma determinada ameaça.

Conforme a norma CETESB P4.261 [10], para os sistemas que transportam gases liquefeitos, tais como GNL e GLP, ou substâncias no estado líquido, utiliza-se como fonte de taxas de falhas o relatório do *Conservation of Clean Air And Water in Europe* (CONCAWE)[5].

2.1.1 Dimensionamento de Defeitos

Para avaliar adequadamente as consequências da falha e o risco operacional, é necessário considerar a categorização do tamanho do orifício para cada modo de falha. De acordo com o banco de dados EGIG 2020 [14], os defeitos de contenção em dutos podem ser subdivididos em três categorias distintas, embasadas no registro histórico de falhas em gasodutos. Essas configurações, segundo relatório EGIG 2020 [14], são denominadas conforme um tamanho especificado de falha:

- (i) Perfuração ou trinca: diâmetro nominal de defeito menor ou igual a 20mm;
- (ii) Furo: diâmetro nominal de defeito maior que 20 mm e menor do que o diâmetro nominal do duto;
- (iii) Ruptura: diâmetro nominal do defeito equivalente ou maior que o diâmetro nominal do duto.

No entanto, há critérios alternativos que também limitam o tamanho para classificação de falhas, tais como os da norma técnica CETESB P4.261 [10], os quais determinam que a perfuração e o furo são classificados, respectivamente, como 5% e 20% de comprometimento do diâmetro interno apresentado pela tubulação.

2.2

Consequência de Falha

A perda de contenção de um oleoduto ou gasoduto pode desencadear um acidente de graves consequências à população no entorno das tubulações. Conforme já mencionado no capítulo introdutório, segundo o código ASME B31.8S-2020 [15], ao avaliar as consequências de uma falha dentro de uma zona de impacto, o operador deve considerar os seguintes fatores:

- (i) Quantitativo e localização de estruturas habitadas no entorno do duto.
- (ii) Proximidade da população em relação ao duto (incluindo barreiras artificiais ou naturais que possam oferecer algum nível de proteção);
- (iii) Proximidade de populações com mobilidade limitada ou comprometida (tais como hospitais, escolas, creches, instalações para idosos, prisões, áreas de recreação), especialmente em áreas externas desprotegidas;
- (iv) Danos à propriedade;
- (v) Danos ambientais;
- (vi) Efeitos do vazamentos de gases não inflamados;
- (vii) Segurança ou confiabilidade no fornecimento de produto transportado, levando-se em consideração impactos causados pela interrupção operacional, por exemplo;
- (viii) Conveniência pública;
- (ix) Potencial para falhas secundárias;
- (x) Duração de um evento de falha, incluindo a despressurização do produto e a possibilidade de incêndio.

Conforme enaltecido pela norma ASME B31.8S-2020 [9], o quantitativo de indivíduos suscetíveis a um impacto causado pela perda de contenção em um duto é de fundamental importância para se dimensionar os possíveis danos sociais a uma população em um cenário de falha. A quantidade de habitações e seus residentes, bem como sua posição relativa em relação à geratriz do duto, são contabilizações pertinentes para uma avaliação de risco, em vista da inflamabilidade do produto vazado e, conseqüentemente, da possibilidade de incêndios.

2.2.1

Classe de Locação

O conceito de classe de locação é definido pelo número de habitações em uma “unidade de classe de locação”; dimensionamento espacial que varia conforme norma utilizada. Em teoria, embora seja um conceito aplicável a projetos de gasodutos, e por isso largamente empregado como parâmetro definidor de risco de ação de terceiros para dutos em geral, o presente estudo irá expandi-lo para aplicações em oleodutos.

2.2.1.1

Classe de Locação (ASME 31.8)

A determinação das classes de locação ao longo de um gasoduto é feita a partir da contagem de edificações destinadas à ocupação humana dentro de uma unidade de classe de locação (Figura 2.1), cujas dimensões são definidas na norma ASME B31.8 [15] e pela NBR 12712 [1], e sua linha de centro correspondendo à diretriz do gasoduto. A contagem é realizada para toda a extensão do gasoduto, percorrendo-se a unidade de classe ao longo de sua diretriz.

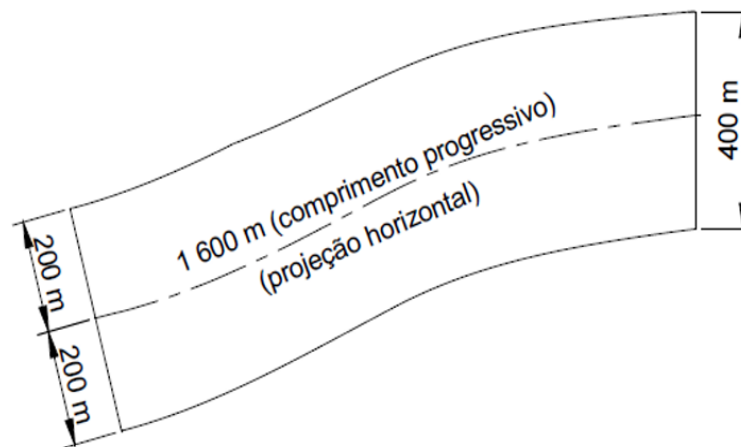


Figura 2.1: Unidade de classe de locação - ASME B31.8 (2020) [1].

Segundo a ANP (Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis), as alterações de classe de locação de gasodutos de transportes terrestres ocorrem devido ao aumento do adensamento populacional ao longo das faixas de gasoduto, comumente compartilhadas com oleodutos. Tais reclassificações incorrem, na maioria dos casos, em uma readequação das condições operacionais do duto, de modo que os transportadores possam continuar o fluxo de escoamento sem se afastar das condições adequadas de segurança,

conforme o projetado. Em adição, o Regulamento Técnico de Dutos Terrestres (RTDT) [16], preconiza que as classes de locação estejam definidas conforme a norma ASME B31.8 [15].

No presente estudo, dados de classe de locação serão utilizados como parâmetros estimativos de densidade populacional [pessoas/ km^2] no entorno de um oleoduto, visto que possibilitam dimensionar um quantitativo aproximado de população residente na região e possíveis vetores de crescimento.

2.2.2

Incêndio em Poça

Incêndios associados ao vazamento acidental de combustíveis inflamáveis, durante seu transporte ou armazenamento, são conhecidos como uma das principais preocupações na indústria de processos. O cenário mais comum e que evolui após as perdas de contenção refere-se ao fenômeno de ignição de poças de combustível (ou incêndio em poça), no qual o produto líquido vazado continua a se espalhar e a queimar.

Em vista desse horizonte acidental, quando um indivíduo é exposto a elevados níveis de radiação térmica, há um risco de incapacitação ou morte devido à hipertermia, dependendo principalmente do fluxo de calor ao qual o cidadão está submetido. Assim, por motivações de segurança, executam-se análises de risco voltadas para esse cenário incidental, as quais envolvem a taxa de queima mássica de combustível, a geometria da chama formada e, sobretudo, a temperatura da chama e sua consequente radiação térmica.

De acordo com o relatório N°96/1996 do HSE [7], *Health & Safe Executive*, o fluxo de calor incidental I [kW/m^2] em um alvo é obtido através do cálculo de fator de vista (F) do indivíduo em relação à chama, da transmissividade atmosférica do ar interveniente (τ) e do poder emissivo superficial da chama E [kW/m^2], conforme apresentado em sequência.

$$I = \tau \cdot F \cdot E \quad (2-1)$$

Análises complexas de radiação térmica emitida pelo fenômeno de incêndio em poça (formas irregulares de poça e chama gerada; cinética complexa; e estado transiente) geralmente requerem o uso de modelos integrais sofisticados ou cálculos de CFD (Dinâmica dos Fluidos Computacional). Em contrapartida, segundo E. Palazzi [2], quando apenas resultados aproximados para esses cenários são desejados, cálculos conservadores tornam-se suficientes e, assim, modelos analíticos relativamente simples podem ser úteis ao descrever classes

inteiras de fenômenos similares por meio de poucas variáveis fundamentais.

Em vista dessas considerações, as seguintes hipóteses simplificadoras são levantadas no estudo de E. Palazzi [2]:

- (i) Condições pseudo-estacionárias;
- (ii) Geometria simples: poças circulares e chama cilíndrica;
- (iii) Taxa global de combustão controlada pela estequiometria (caso a fase gasosa esteja dentro dos limites de inflamabilidade, reações praticamente instantâneas ocorrem devido às altas temperaturas).

Assim, utilizando-se um modelo de chama cilíndrica simples, o poder emissivo superficial (E), conforme supracitado na equação 2-1, é interpretado como constante em toda a superfície da chama.

Em vista das considerações levantadas, a Figura 2.2 ilustra os principais parâmetros utilizados para modelar uma poça circular (P) de raio R_0 , contendo um hidrocarboneto líquido, e uma zona da chama (F) caracterizada por temperatura uniforme, cuja forma é um cilindro de raio R e altura h . Ademais, assume-se que um fluxo de massa m_v de vapor de hidrocarboneto (proveniente da poça) entra na região da chama F , onde se mistura e queima a uma taxa m_v com o ar proveniente do entorno, produzindo um fluxo mássico m_f de fumos que deixam o sistema na altura h .

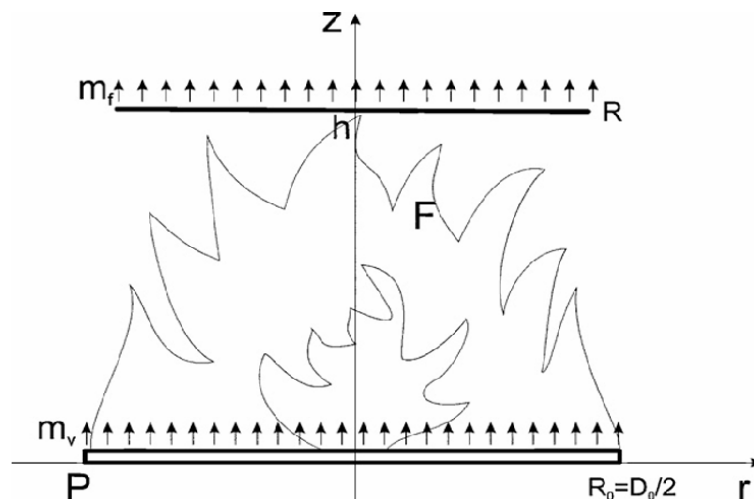


Figura 2.2: Modelo de um incêndio em poça (geometria circular) [2].

2.3

Função Probit

Segundo o HSE [7], para estimar o nível de dano causado por um agente nocivo é necessário quantificar a exposição em termos de intensidade, duração e consequências do fenômeno. Essa avaliação geralmente é concebida por meio de uma comparação entre estimativas de dose recebida e dados experimentais, estatisticamente manipulados, para determinar a probabilidade de dano a uma população ou indivíduo exposto.

Em adição, critérios de vulnerabilidade podem ser estabelecidos para determinar os níveis de exposição que resultam em consequências específicas, tais como hospitalizações e, no caso mais extremo, fatalidades. Assim, dentre as principais abordagens para a determinação dos efeitos da dose recebida destaca-se o uso de funções Probit.

Conforme a referência HSE [7], as funções de probabilidade de fatalidade (Probit) levam em consideração o nível de tolerância para uma dosagem térmica ser letal para uma população exposta, além de se adaptarem a cada tipo de fenômeno danoso. A taxa de fatalidade de população exposta a agentes nocivos durante um determinado período de tempo pode ser calculada utilizando funções Probit que tipicamente assumem a formulação 2-2.

$$Y = k_1 + k_2(\ln V) \quad (2-2)$$

$$V = I^n t \quad (2-3)$$

O parâmetro Y é a medida representativa do número de fatalidades; k_1 e k_2 são variáveis dependentes de cada tipo de fenômeno danoso; e V é a dose térmica que corresponde ao produto do fluxo de calor I [kW/m^2] do agente nocivo, elevado a um expoente $n = 4/3$, pela duração da exposição t expressa em segundos ou minutos. Para os cenário de radiação térmica, V representará a dosagem térmica.

Diversas funções Probit foram desenvolvidas com embasamento experimental e são comumente utilizadas em análises de consequências. Dentre as mais utilizadas, a literatura destaca as desenvolvidas por Eisenberg *et al* [11], Tsao & Perry [12], Lees (1994) e TNO [17] (*Green Book*). Essas funções incluem aplicações para “pele exposta”; cenário no qual não há proteção ao indivíduo ou situações em que alguma proteção é considerada. Em tese, a presença de roupa representa algum grau de proteção ao indivíduo exposto e, por isso,

urge a necessidade de distinção entre as probabilidades de fatalidade para alvos protegidos e não protegidos.

3 Metodologia

Uma prática comum para definir o volume de vazamento em operação é utilizar um *software* comercial de simulação termo-hidráulica transiente, com o qual é possível modelar a abertura desejada de um orifício em uma determinada localização e, por meio de simulação numérica, determinar o volume de vazamento no intervalo de tempo necessário para que a sala de controle detecte e reaja desativando as bombas. Para cada cenário, esse intervalo de tempo deve ser calculado previamente.

Observou-se que a necessidade de tais simulações de volume de vazamento aumentou drasticamente nos últimos anos, dado que os operadores têm exigido esses estudos em áreas de travessias e de alta consequência, o que demanda um número significativo de modelos numéricos e simulações [4]. Em vista dessa problemática, o presente estudo visa elaborar hipóteses simplificadoras para o problema em questão, de forma que fosse possível calcular o volume de vazamento em operação em um oleoduto sem o uso de um *software* termo-hidráulico de escoamento transiente, comumente restrito a poucos pontos de análise devido a limitações computacionais.

Por meio do algoritmo desenvolvido, é possível estimar o volume vazado para todos os pontos do perfil de elevação com espaçamento de malha equivalente ao comprimento de um tubo (12 a 15 *m*). Assim, obtém-se um perfil do volume total de vazamento (em transferência e gravitacional) em todas as localizações ao longo do duto, de acordo com a discretização considerada. Portanto, como ponto de partida, as seguintes premissas simplificadoras foram consideradas:

- Escoamento em regime permanente (ou estacionário);
- Escoamento incompressível e isotérmico na fase líquida;
- Preenchimento do duto com um único produto;
- Produto transportado com pressão de vapor abaixo da pressão atmosférica (não recomendado para GLP e GNV).

3.1

Volume Vazado em Transferência

O volume de transferência, ou volume de operação, é dependente de parâmetros temporais e, portanto, serão utilizados conceitos de vazão [m^3/h].

3.1.1

Volume Vazado em Transferência: Perfuração

Segundo a metodologia a ser adotada, o cálculo da vazão de vazamento em transferência com perfuração, correspondendo a um defeito de 5% em relação ao diâmetro interno D [pol] da tubulação, é governada pela resistência ao escoamento através do furo com saída para a atmosfera de acordo com a equação de *Crane Company* [3], a qual varia em função da pressão no ponto de vazamento $p(j)$, definida pela curva de pressão de regime, e da gravidade específica do fluido SG .

$$Q_{5\%} = \frac{29,9 \cdot (0,05D)^2}{K} \sqrt{\frac{14,22 \cdot p(j)}{SG}} \quad (3-1)$$

O coeficiente K da equação 3-1 refere-se à resistência imposta por um elemento de tubulação à passagem de fluido, podendo ser considerado uma constante para qualquer obstrução (*i.e.*, válvulas ou conexões) sob todas as condições de escoamento, e SG corresponde à gravidade específica do fluido (do inglês, *fluid specific gravity*). Na Figura 3.1 é possível verificar o valor da constante K para diversos tipos de saída disponíveis.

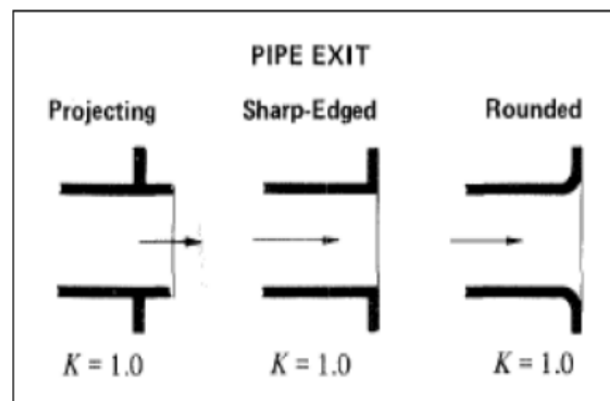


Figura 3.1: Valor de K para saídas de dutos [3].

Para o caso de perfuração com abertura de aproximadamente 5% do diâmetro da tubulação, adotou-se $K = 1$ pressupondo um furo correspondente a um bocal de saída do duto.

3.1.2

Volume Vazado em Transferência: Furo

As premissas de cálculo para vazamento em caso de furo (20% do diâmetro interno D do duto) são semelhantes às apresentadas para a hipótese de perfuração e, portanto, o valor de $K = 1$, pressupondo um furo correspondente a um bocal de saída do duto, também será considerado. Entretanto, devido ao furo apresentar uma vazão mais elevada que a perfuração, a pressão no ponto tende a cair com o passar do tempo até se estabilizar em um valor abaixo da pressão de operação inicial.

Por se tratar de um evento transiente, torna-se necessária uma tradução para o cenário de regime permanente a partir de uma vazão média desde o início do vazamento até a parada do sistema de bombeamento, a qual será definida como sendo metade da vazão no regime permanente inicial. Desse modo, insere-se um fator multiplicativo de 0,5 da vazão inicial no ponto de vazamento na equação de *Crane Company* [3] para um defeito de 20% do diâmetro interno D [pol] do duto, conforme apresentado pela equação 3-2.

$$Q_{20\%} = 0,5 \cdot \frac{29,9 \cdot (0,20D)^2}{K} \sqrt{\frac{14,22 \cdot p(j)}{SG}} \quad (3-2)$$

3.1.3

Volume Vazado em Transferência: Ruptura

Neste item é apresentada a metodologia de cálculo da vazão de vazamento em transferência para a condição de ruptura total do duto, em que o tamanho do furo corresponde a um comprometimento de 100% do diâmetro interno D .

A vazão de vazamento em ruptura total é governada pelo escoamento à montante do defeito. Para o modelo matemático empregado nesse cenário de falha, partiu-se da premissa de que a pressão na entrada é constante e definida pelo primeiro ponto da curva de gradiente de pressão de regime, enquanto a pressão de saída é equivalente a pressão atmosférica de 1,033 kgf/cm².

A perda de pressão por atrito Δp_f é calculada pela equação de *Darcy-Weisbach* apresentada na equação 3-3, em que f corresponde ao fator de atrito adimensional.

$$\Delta p_f = \frac{8\rho L}{\pi^2} \frac{Q^2}{D^5} f \quad (3-3)$$

Para a determinação do fator de atrito f do líquido transportado, será utilizada a expressão implícita de *Colebroke-White*, , conforme exposto na

equação 3-4, em que $D(i)$ representa o diâmetro interno no ponto em estudo e Re o número de Reynolds, cuja formulação é evidenciada na equação 3-5.

$$\frac{1}{\sqrt{f}} = -0,87 \cdot \ln \left[\frac{Ru}{3,7D(i)} + \frac{2,51}{Re\sqrt{f}} \right] \quad (3-4)$$

$$Re = \frac{4\rho Q}{\pi D(i)\mu} \quad (3-5)$$

Por conseguinte, a vazão de vazamento em transferência de ruptura é obtida de forma iterativa para todos os pontos do perfil do duto a partir da equação 3-3, ao se isolar o parâmetro de vazão, Q . Desse modo, considerando i um índice relativo à tabela de dados de perfil do duto, monta-se a equação 3-6.

$$Q(i) = \sqrt{\frac{p(i)\pi^2 D^5}{8\rho L(i)f(i)}} \quad (3-6)$$

Assim, implementa-se um algoritmo iterativo em conformidade com o perfil do duto no cálculo de vazão de transferência para o cenário de ruptura, cujo método estima que a vazão de vazamento diminui à medida que a posição do defeito se afasta do ponto de entrada do duto, onde se encontra a vazão máxima do sistema.

3.2

Volume Vazado Gravitacional

A metodologia para calcular o volume vazado gravitacional considera um sistema de tubulação estagnada (duto parado e com suas extremidades bloqueadas), em que, após a interrupção do sistema de bombeamento, ainda há escoamento do fluido regido apenas pela força gravitacional. Portanto, o cálculo de volume vazado gravitacional independe de parâmetros temporais.

O volume vazado do líquido transportado devido às forças gravitacionais depende da geometria do duto, contemplando perfil de elevação e área interna da tubulação, assim como das condições de abertura das válvulas intermediárias (abertas ou fechadas) e sua categorização (válvulas de bloqueio ou de retenção). Assim, a simplicidade dessa abordagem garante que as estimativas possam ser realizadas de forma mais rápida e para um maior número de pontos, permitindo capturar os cenários de maior relevância necessários aos

estudos de análise de risco ambiental e de integridade, alinhados aos padrões estabelecidos pela indústria.

Essa metodologia, conforme apresentada na referência [4], é semelhante ao procedimento adotado pela Agência de Proteção Ambiental dos Estados Unidos (EPA) para estimar os riscos de vazamento de petróleo.

O volume vazado gravitacional em um dado ponto do duto é calculado usando o algoritmo de ponto de móvel que busca o ponto de maior elevação no duto nas proximidades do local de vazamento. O próximo ponto deve possuir elevação igual ou superior ao ponto atual e, para tal, o algoritmo busca o próximo ponto de maior elevação a partir de uma comparação de coordenadas. Em suma, uma tabela armazena as coordenadas (x, y) e a área transversal correspondente aos segmentos de duto vaporizados, decorrentes da paralização da operação e que apresentam uma elevação igual ou superior ao ponto atual, separando-os em duas categorias: à montante (à esquerda) e à jusante (à direita) do vazamento analisado.

No exemplo mostrado na Figura 4, os segmentos com produto vaporizado são estimados para um dado local de vazamento, sendo gerados à montante e à jusante em relação a esse ponto.

A Figura 3.2 ilustra os segmentos vaporizados à esquerda (*upstream*) enquanto a equação 3-7 quantifica suas contribuições volumétricas devido à gravidade ao multiplicar a área transversal A_i de cada segmento pelo seu comprimento axial $(x_j - x_{j+1})$.

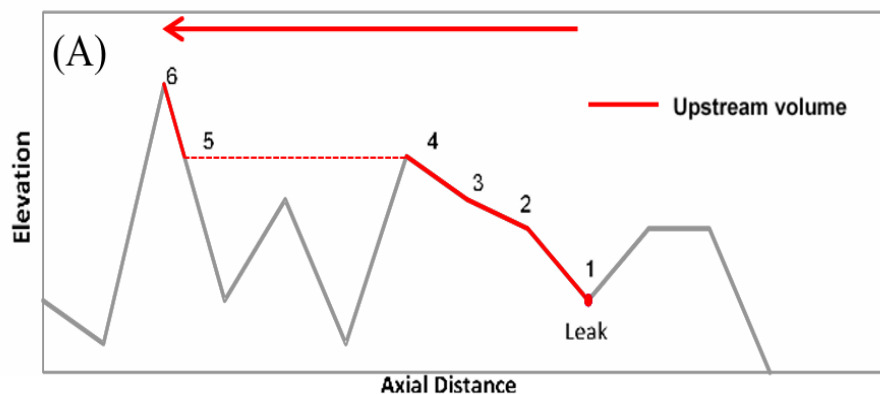


Figura 3.2: Segmentos vaporizados à esquerda do vazamento [4].

$$V_{esquerda}(i) = A_1(x_1 - x_2) + A_2(x_2 - x_3) + A_3(x_3 - x_4) + A_4(x_5 - x_6) \quad (3-7)$$

Analogamente, a Figura 3.3 ilustra os segmentos vaporizados à direita (*downstream*) de um dado ponto de vazamento, enquanto a equação 3-9 contabiliza as contribuições volumétricas devido às forças gravitacionais de cada um desses segmentos. Ressalta-se que, por se tratar de pontos à jusante do vazamento, seu comprimento axial será dado por $(x_{j+1} - x_j)$.

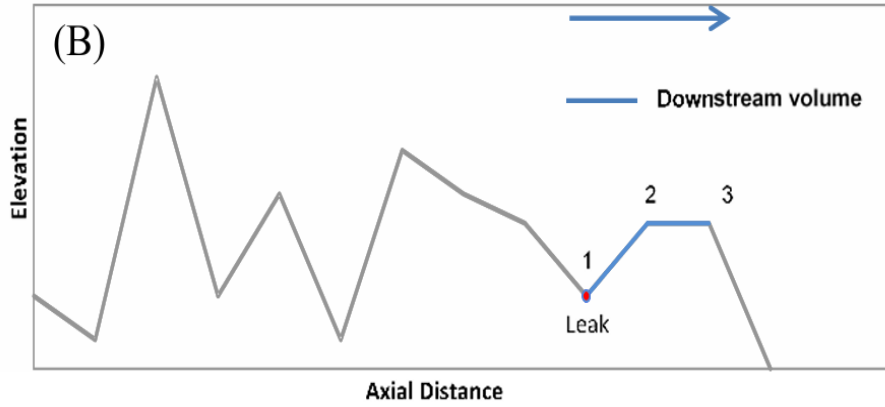


Figura 3.3: Segmentos vaporizados à direita do vazamento [4].

$$V_{direita}(i) = A_1(x_2 - x_1) + A_2(x_3 - x_2) \quad (3-8)$$

Assim, o volume vazado gravitacional V_g para um dado ponto i traduz-se no somatório entre o volume vazado à esquerda e o volume vazado à direita devido às forças gravitacionais. A equação 3-9 sintetiza essa formulação.

$$V_g(i) = V_{esquerda}(i) + V_{direita}(i) \quad (3-9)$$

Conforme previamente exposto, o perfil de máximo volume vazado pode variar em função da condição de abertura das válvulas intermediárias ao longo do duto. Para o cenário de perfuração, devido à pequena dimensão da falha, o tempo para o duto escoar somente em função das forças gravitacionais é muito longo, viabilizando a hipótese de que equipes de manutenção possam ir a campo e fechar as válvulas de bloqueio intermediárias. Entretanto, a mesma argumentação não pode ser aplicada à ruptura e ao furo, pois, nestes casos, a drenagem gravitacional é muito rápida e, portanto, a ação de fechamento das válvulas intermediárias de bloqueio não é considerada efetiva.

Assim, na presente metodologia as válvulas intermediárias são consideradas fechadas no cenário de perfuração, enquanto todas as válvulas interme-

diárias encontram-se abertas para os cenários de furo e ruptura.

3.3

Volume Vazado Total

Ao combinar o volume vazado em transferência com o volume vazado gravitacional, o *software* alcança um cálculo de vazamento total, fornecendo uma malha mais fina e com solução computacional mais rápida, em todo o sistema do oleoduto. Essa análise é realizada para cada ponto do duto, abordando tanto os impactos diretos observados durante a operação quanto os efeitos contínuos influenciados pela gravidade após a interrupção do sistema bombeamento.

As etapas de cálculo dos parâmetros de saída no regime estacionário podem ser visualizadas esquematicamente na Figura 3.4.

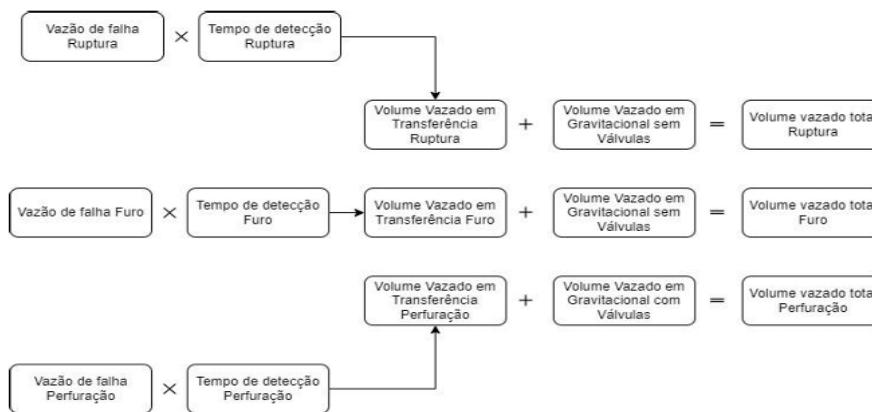


Figura 3.4: Procedimentos de Cálculo de Volume Vazado Total.

O perfil de máximo volume vazado varia em função da condição de abertura das válvulas intermediárias ao longo do duto. Na presente metodologia, todas as válvulas intermediárias são consideradas abertas nos cenários de ruptura (100%) e furo (20%), enquanto no cenário de perfuração (5%), fechadas. Em sequência, apresentam-se os parâmetros para o equacionamento do cálculo de volume vazado total por tipo de falha.

- Vazão de vazamento em transferência de perfuração - $Q_{5\%} [m^3/h]$;
- Vazão de vazamento em transferência de furo - $Q_{20\%} [m^3/h]$;
- Vazão de vazamento em transferência de ruptura - $Q_{100\%} [m^3/h]$;
- Volume gravitacional com válvulas de bloqueio abertas - $V_g [m^3]$;
- Volume gravitacional com válvulas de bloqueio fechadas - $V_{g\text{bloq}} [m^3]$;

- Tempo de detecção e parada do bombeamento para perfuração - $\Delta t_{5\%}$ [min];
- Tempo de detecção e parada do bombeamento para furo - $\Delta t_{20\%}$ [min];
- Tempo de detecção e parada do bombeamento para ruptura - $\Delta t_{100\%}$ [min].

A partir das informações acerca dos tempos de parada das bombas em cada cenário de falha, torna-se possível formular o cálculo dos volumes vazados em transferência. Os volumes vazados operacionais para os casos de perfuração, furo e ruptura são apresentados a seguir, respectivamente.

$$V_{5\%} = Q_{5\%} \cdot \frac{\Delta t_{5\%}}{60} \quad (3-10)$$

$$V_{20\%} = Q_{20\%} \cdot \frac{\Delta t_{20\%}}{60} \quad (3-11)$$

$$V_{100\%} = Q_{100\%} \cdot \frac{\Delta t_{100\%}}{60} \quad (3-12)$$

Com o equacionamento dos volumes vazados operacionais, torna-se possível o cálculo do volume vazado total (V_{total}) para cada cenário de falha. Por meio dos dados de volume gravitacional com válvulas de bloqueio abertas ou fechadas, obtêm-se as seguintes equações:

$$V_{total5\%} = V_{5\%} + V_{g_{bloq}} \quad (3-13)$$

$$V_{total20\%} = V_{20\%} + V_g \quad (3-14)$$

$$V_{total100\%} = V_{100\%} + V_g \quad (3-15)$$

3.4

Cálculo de Consequência e Danos Sociais em Oleodutos

A falha de um oleoduto por vazamento ou ruptura pode evoluir para um incêndio devido à perda de contenção do produto transportado e, eventualmente, causar hospitalizações e fatalidades. Visando obter o risco total de integridade do duto em R\$/(km.ano), torna-se necessária uma estimativa dos

danos sociais, a partir de uma dimensão monetária, para que sejam somados às demais consequências consideradas na avaliação de risco.

A modelagem de danos sociais de oleodutos varia em função do número de fatalidades calculado por incêndio (n) multiplicado pelo valor estatístico da vida (VSL , do inglês *value of a statistical life*) e pela probabilidade de ignição do produto após a falha (p_{ign}), conforme apresentado na equação 3-16. Para essa formulação, o parâmetro *Danos Sociais* é expresso em $R\$/falha$, VSL em $R\$/fatalidade$ e p_{ign} em *incêndios/falha*.

$$Danos\ Sociais = n \cdot VSL \cdot p_{ign} \quad (3-16)$$

Para a estimativa do número de fatalidades decorrentes de um incêndio, o mesmo procedimento de classificação das edificações no entorno do duto, valores de fluxo de calor e cálculo da probabilidade de fatalidade, com base na equação de Tsao C.K. & Perry W.W. [12], é utilizado. No entanto, há o diferencial do modelo de incêndio aplicado, sendo este o modelo de incêndio em poça.

Conforme apresentado no relatório HSE96/1996 [7], o fluxo de calor (I) recebido em um ponto próximo a um incêndio pode ser expresso pela equação 2-1. Nessa formulação, o fluxo de calor I é expresso kW/m^2 , τ representa a transmissividade atmosférica, F é o fator de forma ou de vista, e E é a emissividade da superfície da chama expressa em kW/m^2 .

O fator de forma ou de vista F depende da geometria, da área da chama gerada e da posição relativa entre a chama e o observador. De modo geral, assume-se um formato cilíndrico para a chama, cujas dimensões provêm de uma estimativa para o cálculo do fluxo de calor.

O trabalho de Palazzi propôs um modelo simplificado para determinar o fluxo de calor I recebido em um ponto localizado a uma distância r do centro da poça de diâmetro D ; ambos expressos em metros. O modelo de cálculo de Palazzi assume que a superfície de irradiação de calor possui área igual à superfície da poça, além de considerar o calor oriundo de apenas um único ponto e a transmissividade atmosférica como sendo ideal ($\tau = 1$). Desse modo, a partir dessas premissas, a equação 2-1 é simplificada para:

$$I = \frac{E \cdot D^2}{16R^2} \quad (3-17)$$

A expressão 3-18 remaneja os termos da equação 3-17, fornecendo a medida do centro da poça (R) associada a um determinado fluxo de calor

gerado por um incêndio.

$$R = \sqrt{\frac{E \cdot D^2}{16 \cdot I}} \quad (3-18)$$

A emissividade da chama (E) é calculada conforme recomendado pelo HSE CRR 96/1996, utilizando a fórmula 3-19, onde k é um parâmetro experimental expresso em m^{-1} .

$$E = E_1(1 - e^{-kD}) + E_2e^{-kD} \quad (3-19)$$

A Tabela 3.1 apresenta os parâmetros E_1 , E_2 e k em função do tipo de fluido transportado:

Tabela 3.1: Emissividade dos Produtos para Incêndio em Poça (HSE) [7].

Fluido	E_2 (kW/m ²)	E_1 (kW/m ²)	k (m ⁻¹)
GLP	250	0	0,55
GNL	265	0	0,15
Outros Hidrocarbonetos	20	140	0,12

† GLP: Gás Liquefeito de Petróleo; GNL: Gás Natural Liquefeito.

O cálculo da área de poça é estimado baseado em dados estatísticos apresentados pelo CONCAWE [5] e atualizados para vazamentos que tenham ocorrido entre os anos de 2001 a 2018, conforme apresentado na Tabela 2:

Tabela 3.2: Volume Vazado versus Área de poça - CONCAWE (2001-2018) [5].

Volume Vazado (m ³)	Área de poça (m ²)
3,5	491
24,4	1539
84,8	1943
216	10388
775	15000
3950	50000

A partir destes dados de volume vazado (v) e consequente área de poça (S), gera-se um polinômio ajustado pelo método de mínimos quadrados e, como resultado, obtém-se a equação 3-20.

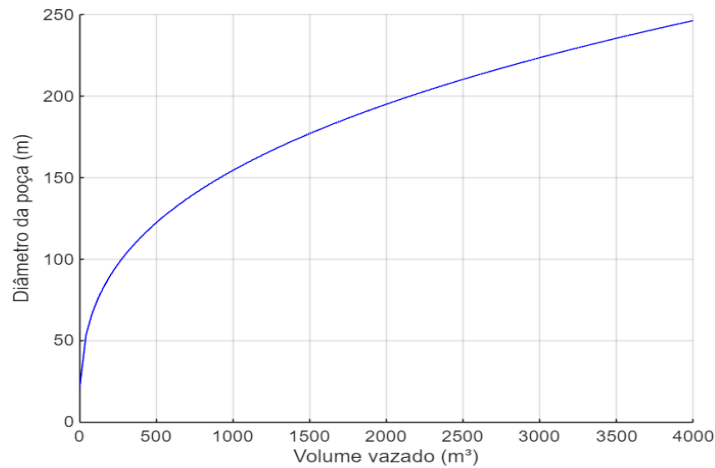


Figura 3.5: Diâmetro de Poça *versus* Volume Vazado - Registros CONCAWE (2001-2018) [5].

$$S = 178,66 \cdot v^{0,6737} \quad (3-20)$$

A Figura 3.5 ilustra graficamente essa otimização, onde o eixo das ordenadas está em função do diâmetro de poça.

3.5 Cálculo de Fatalidades

A partir de dados de dosagem térmica provindos do estudo de caso, serão avaliadas diferentes abordagens para a avaliação do número de fatalidades, partindo-se dos conceitos de classes de locação adaptados para oleoduto ou da contagem direta de habitações. A seguir, listam-se os métodos empregados:

- Método 1: Densidade populacional com função Probit;
- Método 2: Contagem de habitações com função Probit;
- Método 3: Densidade populacional com aproximação linear;
- Método 4: Contagem de habitações com aproximação linear.

Nesta seção, detalha-se o procedimento de obtenção da curva de porcentagem de fatalidade ao longo da distância em relação ao incêndio em poça, denominada como raio de impacto. Inicialmente a quantificação de danos é mensurada através de funções de probabilidades Probit (Eisenberg *et al* [11], Tsao&Perry [12], Leess (1994) e TNO [17]). Em sequência, a metodologia para se encontrar os raios de impacto que gerem 1% e 100% de fatalidades é apresentada. Por fim, mostra-se a metodologia de obtenção da curva de porcentagem de fatalidade entre esses dois limites de raio de impacto.

3.5.1

Número de Fatalidades: Função Probit

A função Probit pode ser aplicada tanto em abordagens de densidade populacional, partindo-se dos conceitos de classes de locação adaptados para oleoduto, quanto na contagem direta do número de habitações. Assim, por meio dos dados de dosagem térmica coletados, serão aplicados diferentes modelos Probit para a avaliação do número de fatalidades.

Com base na equação 2-3, para o cenário de radiação térmica, o parâmetro V representará a dosagem térmica e seguirá a formulação 3-21. Nessas condições, o parâmetro V será expresso em $(kW/m^2)^{4/3} \cdot s$, o fluxo de calor I em kW/m^2 e o tempo de exposição t em segundos. De modo geral, considera-se um tempo de exposição de 20s para um cálculo padronizado da dosagem térmica.

$$V = I^{3/4} t \quad (3-21)$$

Considerando o equacionamento geral para funções Probit (eq. 2-2), têm-se uma formulação particular para cada modelo proposto, conforme exposto na Tabela 3.3.

Tabela 3.3: Modelos de funções probits para exposição à radiação térmica (HSE) [7].

Modelo	Função Probit
Eisenberg et al (1975)	$Y = -14,9 + 2,56 \ln V$
Tsao & Perry (1979)	$Y = -12,8 + 2,56 \ln V$
Lees (1994)	$Y = -10,7 + 1,99 \ln V$
TNO	$Y = -15,3 + 3,02 \ln V$

Por conseguinte, a Figura 3.6 consolida as curvas geradas para cada função Probit apresentada nesse estudo.

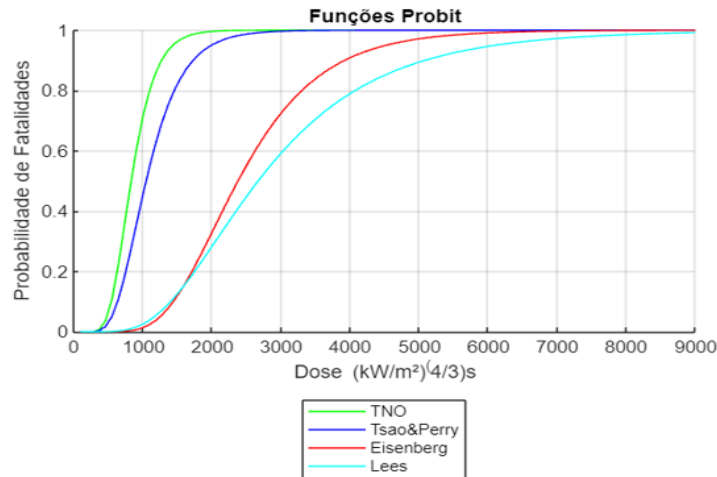


Figura 3.6: Funções Probit.

Dentre as formulações apresentadas, optou-se pela análise dos equacionamentos Probit de Eisenberg [11] e TSAO&Perry [12] no presente estudo.

3.5.2

Raios de Fatalidade: $R_{1\%}$ e $R_{100\%}$

Conforme norma CETESB P4.261[10], o raio de impacto x [m] é definido como a distância entre o evento de falha e o alvo atingido. Cada raio de impacto delimita um contorno circular, no qual indivíduos que estejam localizados nele recebem a mesma probabilidade de fatalidade.

Segundo M.J. Stephens [18], um fluxo de calor de $15,77 \text{ kW/m}^2$ é considerado suficiente para causar 1% de fatalidades em um intervalo de tempo de 30 segundos, enquanto um de $31,55 \text{ kW/m}^2$ é capaz de gerar 100% de fatalidades em 35 segundos. Assim, padronizando-se esses valores na base de cálculo, para a obtenção dos raios de 1% ($R_{1\%}$) e 100% ($R_{100\%}$) de fatalidades, aplicou-se a equação de Palazzi (eq. 3-18).

$$R_{1\%} = \sqrt{\frac{E \cdot D^2}{16 \cdot 15,77}} \quad (3-22)$$

$$R_{100\%} = \sqrt{\frac{E \cdot D^2}{16 \cdot 31,55}} \quad (3-23)$$

Uma vez delimitados os raios de impacto para 1% e 100% de fatalidades, pode-se obter o comportamento da curva de porcentagem de fatalidades entre

essas delimitações. Para tal, foram consideradas duas abordagens matemáticas para a quantificação de população impactada entre os raios $R_{1\%}$ e $R_{100\%}$:

- Densidade populacional média: método de integração numérica.
- Contagem habitacional: método de interpolação linear.

Para o método de integração numérica, foram definidos 100 raios de impacto intermediários, de igual espaçamento Δr , aos raios limites de 1% e 100% de fatalidades. Assim, para cada raio intermediário contabilizado, adiciona-se espacialmente uma coroa circular à zona de impacto imediatamente anterior, calculando-se a dosagem térmica e, conseqüentemente, seu comportamento em função do raio de impacto.

Em suma, segundo S. Cunha [6], uma integração numérica simplificada pode ser utilizada para calcular o número de fatalidades N causadas por um incêndio ao se assumir: uma densidade populacional uniforme δ_{pop} , nenhuma fatalidade além dos limites de 1% e 100%, e uma taxa de mortalidade linear entre os raios $R_{1\%}$ e $R_{100\%}$. A Figura 3.7 [6] ilustra essas premissas e a equação 3-24 formula os conceitos apresentados.

$$N = \delta_{pop} \frac{\pi}{3} (R_{1\%}^2 + R_{100\%}^2 + R_{1\%}R_{100\%}) \quad (3-24)$$

Para o método de interpolação linear, ou aproximação linear, constrói-se uma função linear a partir da distância do centro da poça (R) e o número de fatalidades obtidas entre os raios $R_{1\%}$ e $R_{100\%}$, conforme ilustrado pela Figura 3.7.

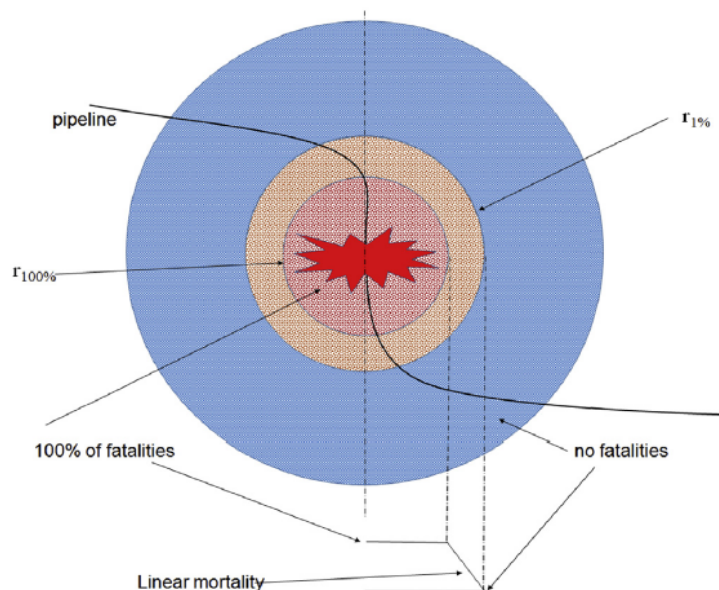


Figura 3.7: Raios de 1% a 100% de probabilidade de fatalidade [6].

3.5.3 Densidade Populacional Média

Para o cálculo da densidade populacional média, utilizou-se o conceito de classe de locação apresentado no capítulo 2, "Revisão Bibliográfica". Para o oleoduto selecionado, os dados de classe de locação determinarão a densidade média ponto a ponto. A Tabela 3.4 traduz essa conversão com base nas normas ASME B31.8 [15] e NBR 12712 [1].

Tabela 3.4: Densidade populacional média em função da classe de locação (ASME B31.8 e NBR 12712).

Classe	Habitacões	Pessoas/ habitacão	Pessoas	Densidade (pessoas/km ²)
1	5	4	20	30
2	25	4	100	150
3	120	4	480	750
4	600	4	2400	3750

† Unidade de classe de locação: área aproximada de 0,64 km², segundo ASME B31.8 [15] e NBR 12712 [1].

4

Estudo de Caso: Resultados

Neste capítulo serão consolidados e discutidos os resultados de um estudo de caso com enfoque nas consequências de vazamento em um oleduto hipotético situado no estado de São Paulo. Para a geração dos cenários, fomentou-se a ferramenta SIMPIPE SUITE, uma plataforma comercial para soluções de engenharia de dutos com módulos para reclassificação e análises de risco. A tabela abaixo consolida a base de dados implementada na ferramenta de simulação, a qual engloba propriedades físicas do material do oleoduto, parâmetros operacionais (tempos de detecção e parada do sistema de bombeamento) e características do produto transportado.

Tabela 4.1: Especificações do produto transportado e da operação.

Parâmetro	Especificação
Produto	Etanol (anidro e hidratado)
Densidade do produto [kg/m^3]	800
Vazão [m^3/h]	840
Diâmetro externo [pol.]	16
Espessura nominal [pol.]	0,281 / 0,344
Comprimento desenvolvido [km]	62,750
Material	Aço carbono (API 5L X70)
Rugosidade superficial [pol.]	0,0018
Temperatura máxima de operação	Ambiente (20°C)
Tempo de parada [min]	6

† Espessura de 0,344 [pol.] para travessias e cruzamentos.

† Tempo de parada: referente à interrupção do bombeamento (cálculo do volume vazado em transferência).

Conforme apresentado no capítulo 3, as consequências provindas de cada tipo de falha (perfuração, furo e ruptura) serão divididas com base nas seguintes abordagens de quantificação populacional e estimativa do número de fatalidades:

- Método 1: Densidade populacional com função Probit;
- Método 2: Contagem de habitações com função Probit;
- Método 3: Densidade populacional com aproximação linear;
- Método 4: Contagem de habitações com aproximação linear.

4.1 Volumes Vazados

A metodologia desenvolvida permite comparar todos os resultados obtidos para cada ponto do oleoduto, a partir de uma discretização junta-a-junta (malha espacial com comprimento de um tubo), conforme mostrado na Figura 4.2 para perfuração (5%), na Figura 4.4 para furo (20%) e a Figura 4.6 para ruptura total (100%). Nessas ilustrações, é possível observar o perfil do volume potencial vazado em transferência, gravitacional e total.

A seguir, a Figura 4.1 apresenta um comparativo entre os volumes vazados totais para os cenários de falha abordados.

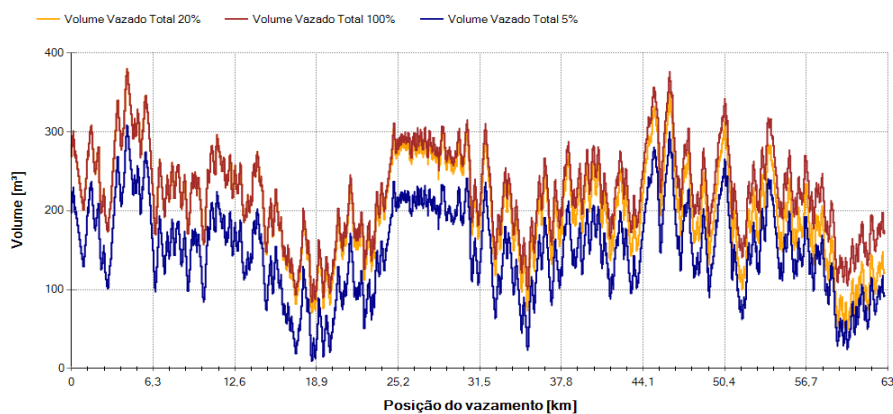


Figura 4.1: Volume vazado total para cada cenário de falha.

Conforme o esperado, o cenário de ruptura, o qual reflete um comprometimento de 100% do diâmetro nominal, apresenta o maior volume vazado total dentre os casos estudados. Ademais, para melhor visualização das componentes do volume vazado total, serão apresentados, para cada evento de falha, os volumes vazados gravitacionais e operacionais (em transferência).

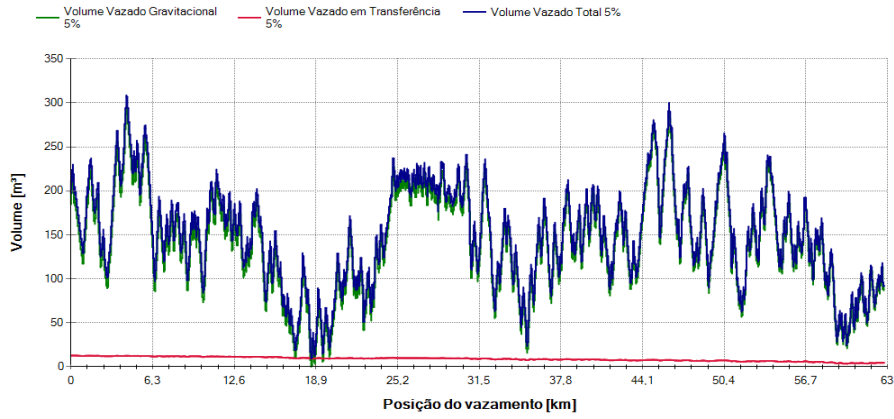


Figura 4.2: Perfuração: volumes vazados gravitacional, operacional e total.

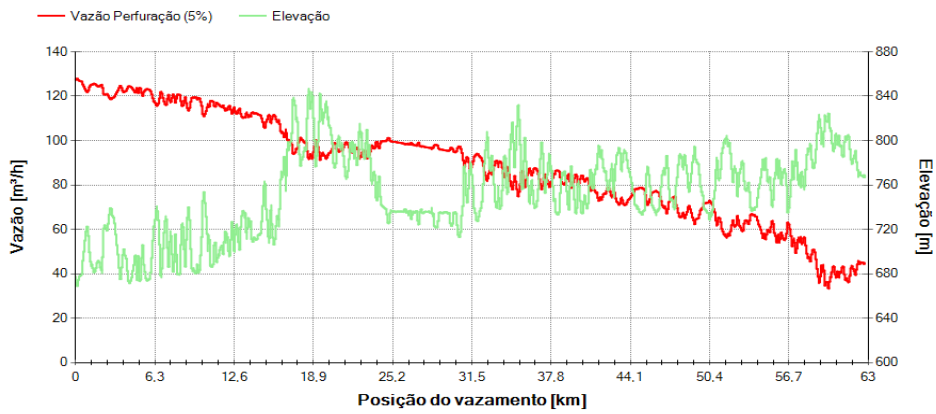


Figura 4.3: Perfuração: vazão de transferência.

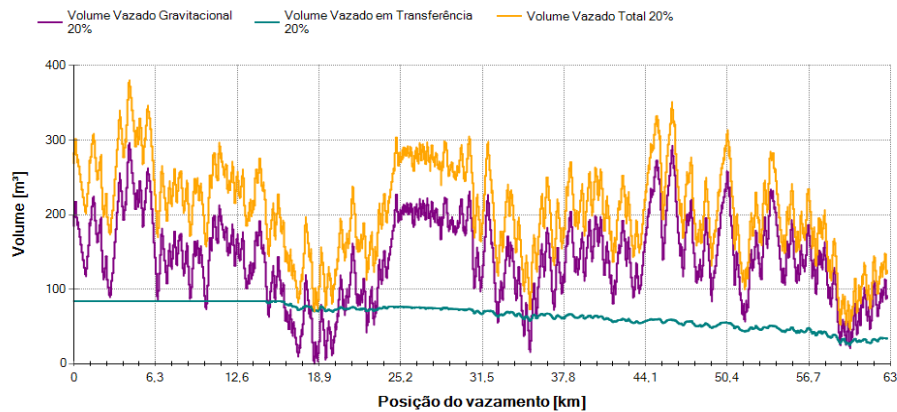


Figura 4.4: Furo: volumes vazados gravitacional, operacional e total.

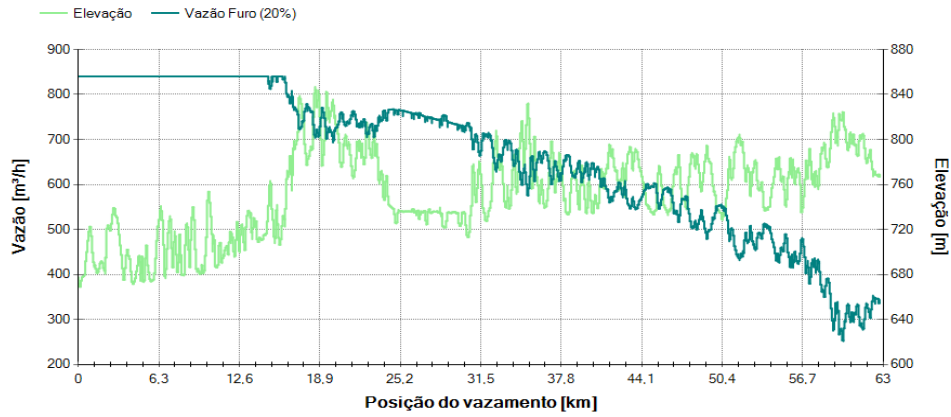


Figura 4.5: Furo: vazão de transferência.

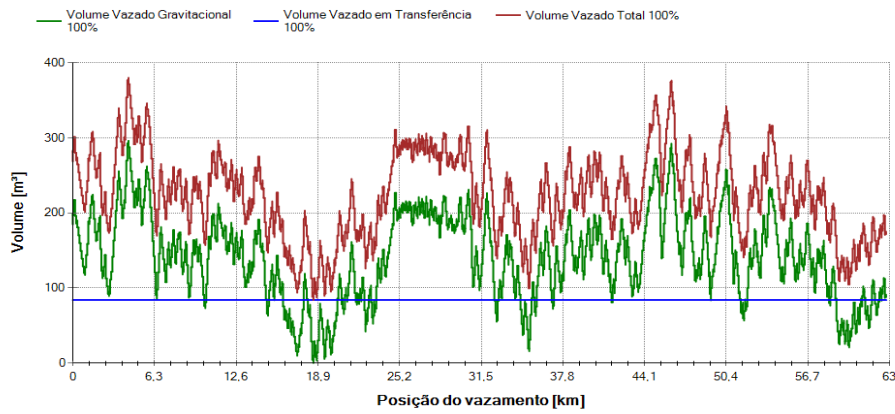


Figura 4.6: Ruptura: volumes vazados gravitacional, operacional e total.

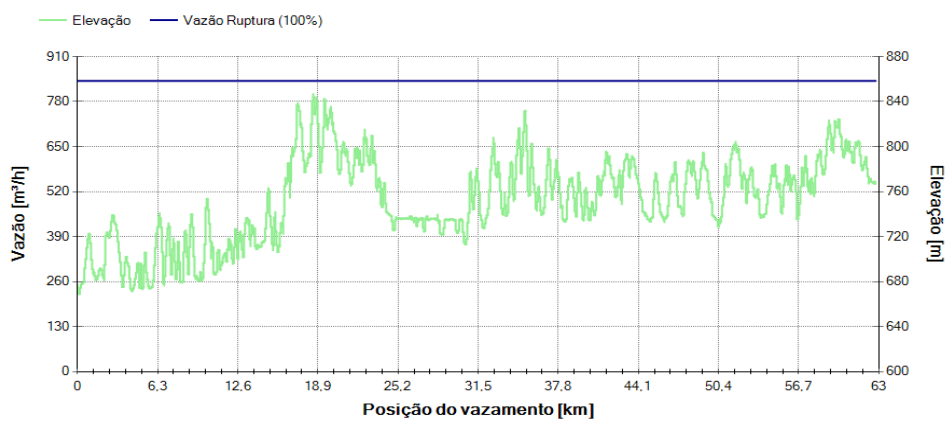


Figura 4.7: Ruptura: vazão de transferência.

Assim, em vista das Figuras 4.2 a 4.7, percebe-se a notável influência do volume vazado gravitacional no perfil total de vazamento. Ademais, nota-se que

os volumes vazados operacionais (em transferência) dependem das condições hidráulicas de operação, além do tempo necessário para detecção do vazamento e início dos procedimentos de desligamento das bombas.

4.2

Fatalidades: Quantificação Populacional por Densidade e por Contagem de Habitações

A seguinte seção é subdividida entre as abordagens de densidade populacional [pessoas/ km^2] e contagem de habitações. Em concordância com o conteúdo exposto no capítulo de metodologia, o cálculo de densidade populacional é dependente das classes de locação ao longo do oleoduto analisado e, portanto, a Figura 4.8 ilustra essa variação conforme a progressão do comprimento desenvolvido do duto.

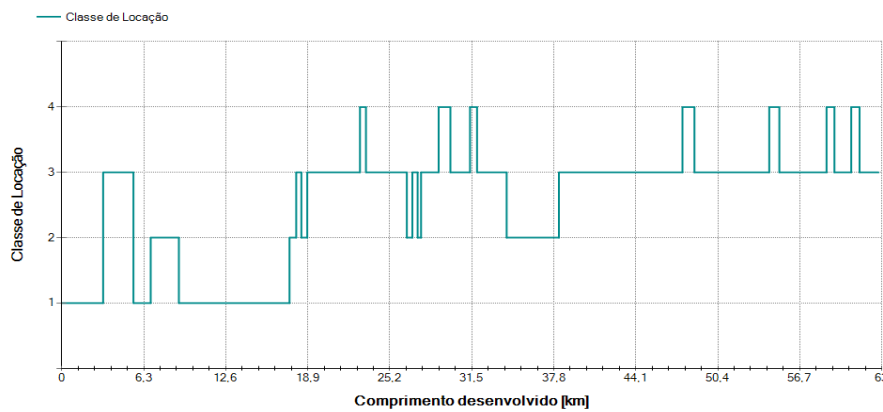


Figura 4.8: Distribuição da classe de locação conforme comprimento desenvolvido do duto.

No presente estudo, a configuração populacional da região metropolitana paulista provém do banco de dados do IBGE (censo demográfico de 2022), juntamente ao mapeamento das habitações situadas no entorno do oleoduto analisado, o qual foi possibilitado pela ferramenta Google *Earth Pro*.

Assim, a partir dos dados populacionais coletados e com base na metodologia de classe de locação apresentada na seção 2.2.1, amparada pela norma ASME B31.8 [15], configura-se o perfil de distribuição de classes apresentado na Figura 4.8.

4.2.1

Cálculo de Fatalidade por Funções Probit - Eisenberg *et al* e TSAO&Perry

A presente seção possui como enfoque análises comparativas entre as funções Probit de Eisenberg [11] e TSAO&Perry [12] no que tangem às

estimativas de probabilidade de fatalidades.

Conforme observado na Figura 4.9, para um cenário incidental de perfuração (*pinhole*) utilizando densidade populacional como método estimativo para quantificar o adensamento populacional no entorno do oleoduto, a função Probit de TSAO&Perry apresenta um maior número de fatalidades ponto a ponto quando comparada a de Eisenberg. Para o oleoduto analisado, o ponto de maior contabilização de mortes ocorreu na posição 31,9 [km], estimando um quantitativo de 7 a 8 mortes com base na formulação de TSAO&Perry.

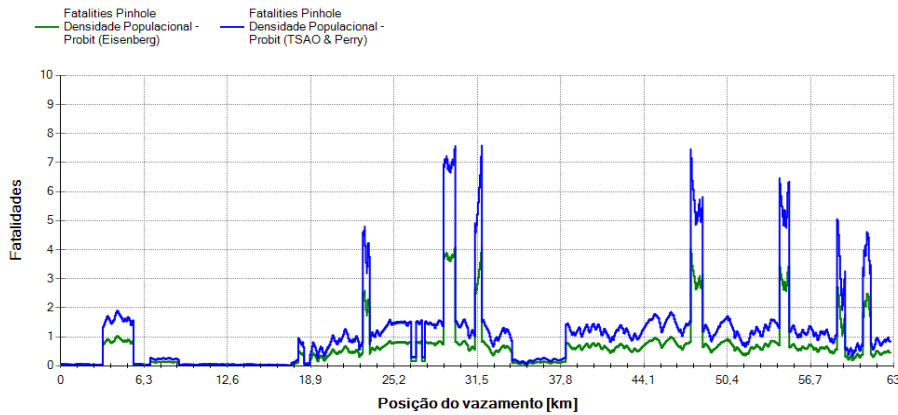


Figura 4.9: Perfuração: cálculo de fatalidades por densidade utilizando funções Probit (Eisenberg e TSAO&Perry).

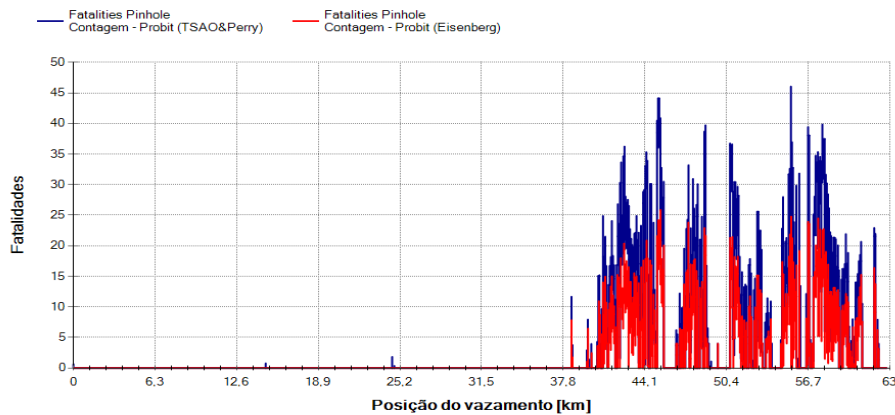


Figura 4.10: Perfuração: cálculo de fatalidades por contagem utilizando funções Probit (Eisenberg e TSAO&Perry).

Sobre uma mesma óptica comparativa entre formulações Probit, agora para a metodologia de contagem, a Figura 4.10 também apresenta uma maior projeção de fatalidades pela função TSAO&Perry. Em contrapartida, ao se comparar as metodologias de quantificação populacional, independente de qual

função Probit utilizada, o cenário incidental de pequeno vazamento (5%) é mais crítico perante uma análise por contagem de habitações. Na Figura 4.10, diferentemente da quilometragem analisada na Figura 4.9 (31,9 [km]), o marco de posição 55,4 [km] apresenta o maior quantitativo de fatalidades, com uma estimativa de 46 a 47 mortes.

Analogamente, os mesmos procedimentos comparativos foram realizados para os cenários de furo (20%) e ruptura (100%), conforme observado nas Figuras 4.11 a 4.12 (*hole*), e nas Figuras 4.13 a 4.14 (*rupture*).

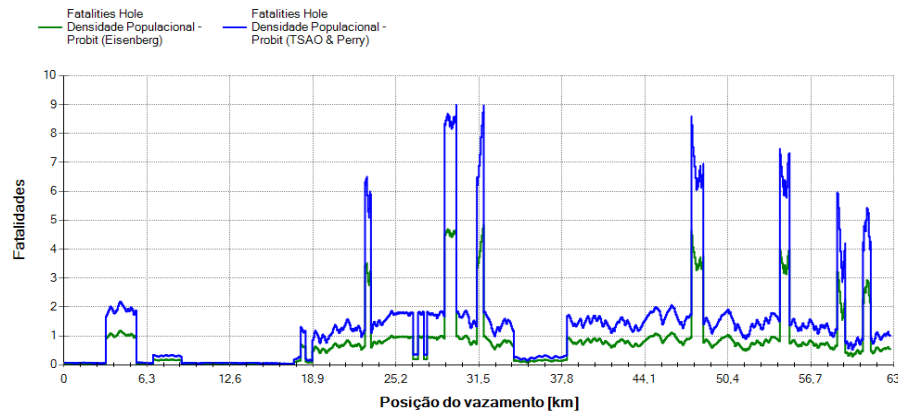


Figura 4.11: Furo: cálculo de fatalidades por densidade utilizando funções Probit (Eisenberg e TSAO&Perry).

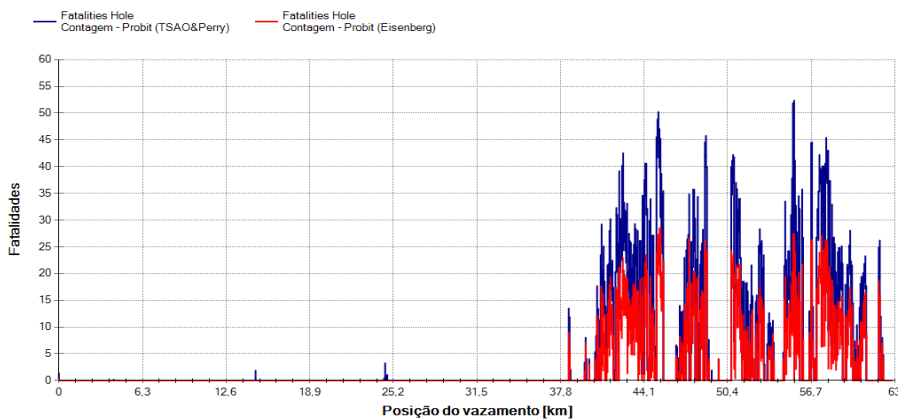


Figura 4.12: Furo: cálculo de fatalidades por contagem utilizando funções Probit (Eisenberg e TSAO&Perry).

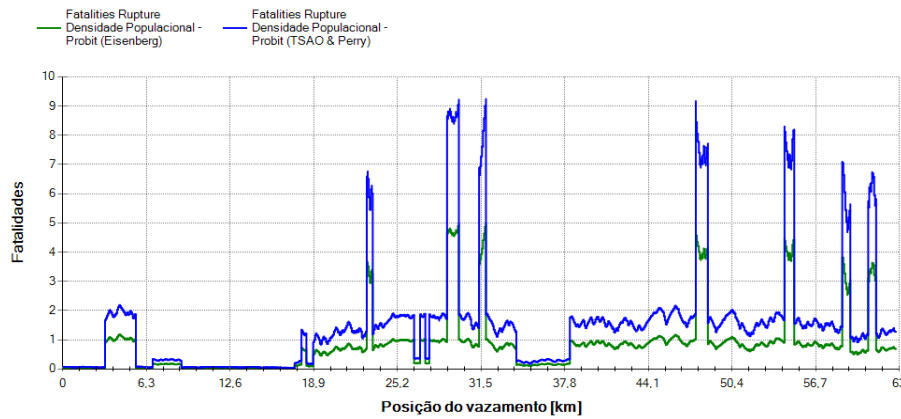


Figura 4.13: Ruptura: cálculo de fatalidades por densidade utilizando funções Probit (Eisenberg e TSAO&Perry).

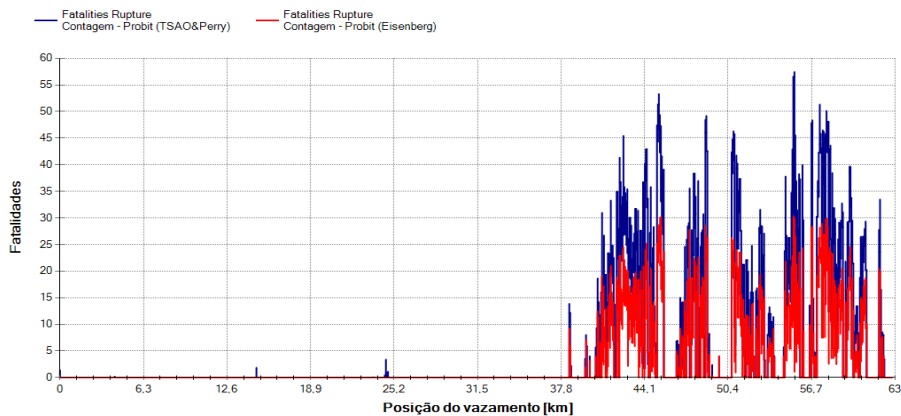


Figura 4.14: Ruptura: cálculo de fatalidades por contagem utilizando funções Probit (Eisenberg e TSAO&Perry).

Em concordância com o já exposto no cenário de perfuração, a função Probit de TSAO&Perry, para furo e ruptura, também projeta uma maior número de fatalidades, tanto para a metodologia de densidade populacional quanto para a de contagem, quando comparada aos resultados da função Eisenberg. Portanto, para todos os cenários de falha (5%, 20% e 100% de comprometimento de diâmetro), o equacionemnto de TSAO&Perry pode ser considerado uma formulação mais conservadora para análises de risco.

De modo geral, a metodologia de contagem apresenta uma maior quantificação de número de fatalidades do que o processo de densidade. Isso ocorre, pois, para todos os cenários de falha, a densidade populacional acaba por homogeneizar a distribuição de habitações na região do oleoduto, formulando, assim, uma densidade média no entorno do duto. Por outro lado, o método de

contagem afere a distância entre cada edificação nas redondezas em relação à diretriz do duto, capturando de forma mais realista a densidade populacional próximo da fonte de risco.

Em outras palavras, a configuração das habitações em relação ao oleoduto é de suma importância para a determinação do grau de periculosidade caso haja um evento de falha, visto que populações mais próximas ao duto, apresentando menor distanciamento em relação a linha tronco do ativo, são mais suscetíveis à exposição térmica em caso de incêndio; diferentemente de populações mais afastadas. Assim, a quantificação populacional por classe de locação (densidade populacional) pode ser um método mais conservador em regiões com baixa contagem de habitações, tornando-se mais adequado para avaliações de consequências em localidades onde o método de contagem não identifica habitações no entorno, sendo capaz de estimar possíveis vetores de crescimento.

A partir dos gráficos anteriormente apresentados (Figuras 4.9 a 4.14), percebe-se que a metodologia de contagem quantifica uma maior número de habitações impactadas por uma falha na posição 55,4 [km], ao contrário do método por densidade, o qual informa o ponto 31,9 [km] (classe de locação 4) como posição mais crítica de fatalidade para os casos de perfuração e ruptura, e o ponto de máxima fatalidade 29,8 [km] para o cenário de furo. Infere-se, portanto, que o adensamento de edificações é mais acentuado a partir da posição 47,7 [km] (alternância apenas entre classes de locação 3 e 4 segundo Figura 4.8) e as edificações contabilizadas estão mais próximas da diretriz do duto.

Assim, tendo a contagem como melhor método de quantificação de habitações no entorno do oleoduto e optando-se pela função de TSAO&Perry para o cálculo do número de fatalidades, devido aos resultados mais conservadores, o cenário de furo estima um maior número de fatalidades na posição 55,4 [km], entre 52 a 53 mortes (Figura 4.12), enquanto o cenário de ruptura também apresenta como ponto de máximo a posição 55,4 [km], mas com registro de 57 a 58 fatalidades (Figura 4.14). Por fim, conforme o esperado, o cenário de ruptura é o mais crítico dentre os eventos de falha no que tange o cálculo de fatalidades junta-a-junta.

A Tabela 4.2 sintetiza os resultados descritos para cada abordagem e cenários levantados, já considerando a função Probit TSAO&Perry como a formulação mais conservadora.

Tabela 4.2: Dados de máxima fatalidade para cada cenário de falha

Tamanho do defeito	Metodologia	Posição de máxima fatalidade	nº de fatalidades
Perfuração	Densidade TSAO&Perry	km 31,9	7 a 8
	Contagem TSAO&Perry	km 55,4	46 a 47
Furo	Densidade TSAO&Perry	km 29,8	8 a 9
	Contagem TSAO&Perry	km 55,4	52 a 53
Ruptura	Densidade TSAO&Perry	km 31,9	9 a 10
	Contagem TSAO&Perry	km 55,4	57 a 58

O cenário de furo apresentou uma posição diferente dos demais casos no que se refere à densidade populacional por função Probit TSAO&Perry. Para os cenários de perfuração e ruptura, a posição de máxima fatalidade ocorre em 31,9 *km*, entretanto, para furo, a localidade de máxima mortalidade resultou na posição 29,8 *km*. Por meio de uma análise numérica mais precisa no cenário de furo (20%), o marco 29,8 *km* apresentou 8,994 mortalidades, enquanto o *km* 31,9 resultou em 8,970.

4.2.2 Cálculo de Fatalidade por Aproximação Linear

Nesta seção, será empregado o método de aproximação linear para estimativa do número de fatalidades, já mencionado no capítulo de metodologia. As Figuras 4.15, 4.16 e 4.17 consolidam os resultados para os cenários de perfuração (*pinhole*), furo (*hole*) e ruptura total (*rupture*), respectivamente.

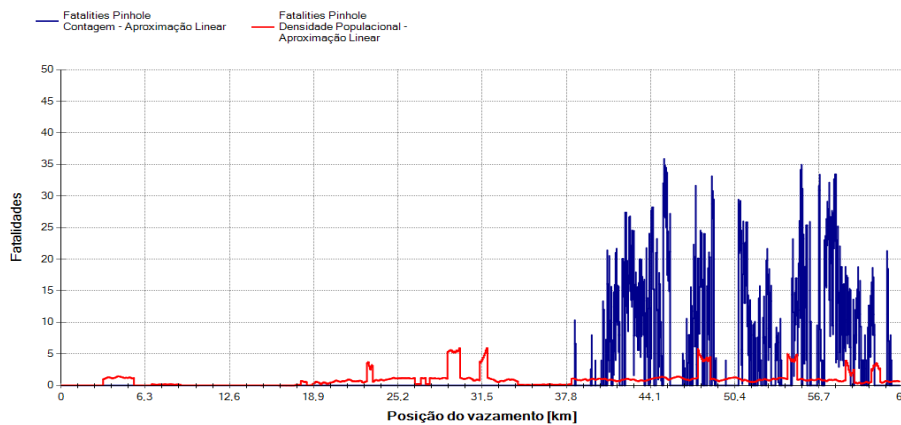


Figura 4.15: Perfuração: cálculo de fatalidades utilizando aproximação linear.

A Figura 4.15 apresenta a posição 45,2 [*km*] com 35 a 36 mortes como o ponto de maior número de fatalidades para o caso de perfuração, em discordância com os resultados de Probit TSAO&Perry, que estima um maior número de fatalidades entre 46 a 47 mortes na posição 55,4 [*km*] (Tabela 4.2).

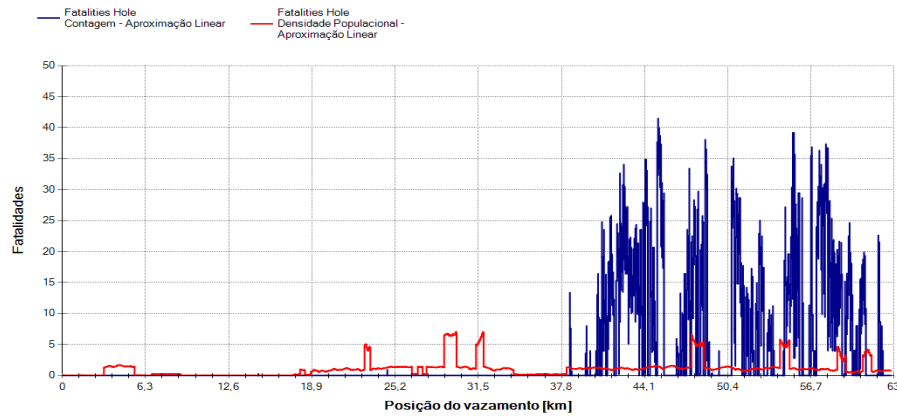


Figura 4.16: Furo: cálculo de fatalidades utilizando aproximação linear.

A Figura 4.16 apresenta a posição 45,2 [km] com 42 a 43 mortes. Esse é o ponto de maior número de fatalidades para o caso de furo, em discordância com os resultados de Probit TSAO&Perry, que estima um número de fatalidades entre 52 a 53 na posição 55,4 [km] (Tabela 4.2).

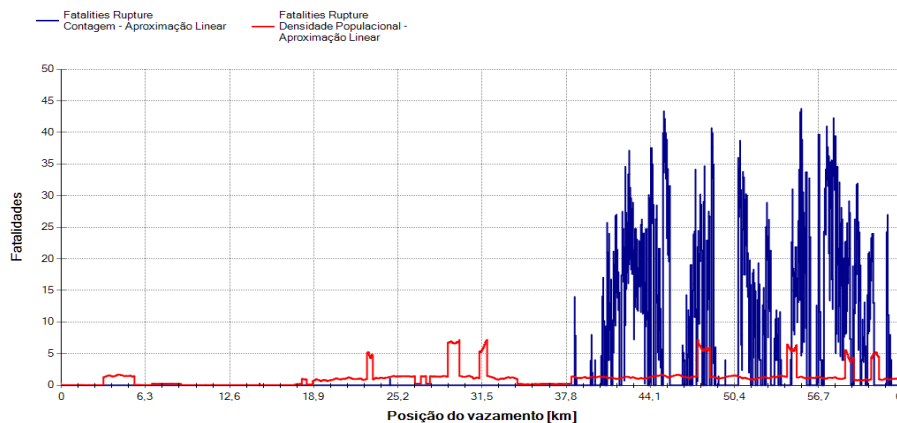


Figura 4.17: Ruptura: cálculo de fatalidades utilizando aproximação linear.

No cenário de ruptura para aproximação linear e contagem, Figura 4.17, a posição 55,4 km é o ponto mais crítico de fatalidades, apresentando um resultado de 44 a 45 mortes. Tal resultado é inferior ao apresentado pela metodologia Probit TSAO&Perry por contagem (57 a 58 fatalidades), porém, compartilhando a mesma posição.

Assim, conforme já observado nas análises por função Probit, o método de contagem é mais efetivo para análises de risco ao proporcionar uma melhor estimativa de fatalidades com base na configuração populacional e sua distribuição ao longo do perfil do duto.

As Figuras 4.18 a 4.20 ilustram graficamente os cálculos de fatalidades por função Probit TSAO&Perry e por aproximação linear, a partir do método de contagem habitacional.

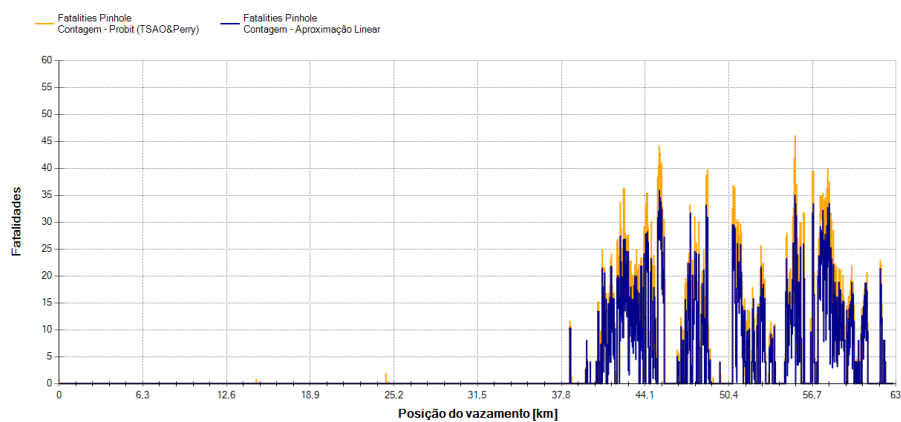


Figura 4.18: Perfuração: comparativo entre função Probit (TSAO&Perry) e aproximação linear.

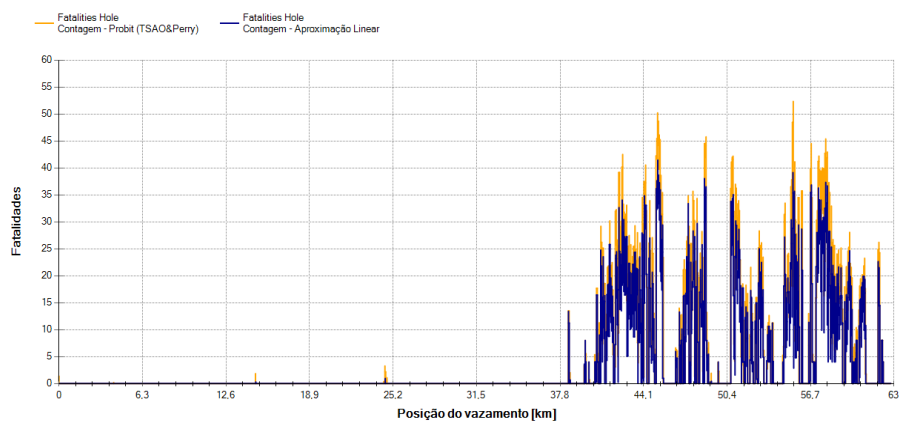


Figura 4.19: Furo: comparativo entre função Probit (TSAO&Perry) e aproximação linear.

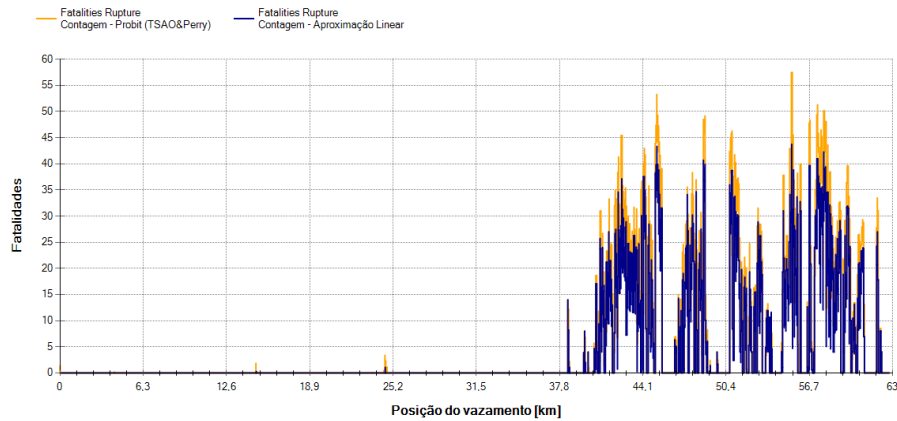


Figura 4.20: Ruptura: comparativo entre função Probit (TSAO&Perry) e aproximação linear.

Desse modo, percebe-se que o método de aproximação linear apresenta um menor número de fatalidades, quando comparado à função Probit de TSAO&Perry, para a maioria das juntas analisadas. Assim, infere-se que o cálculo por contagem de habitações, utilizando a função Probit (TSAO&Perry) como método estimativo de fatalidades, é o mais conservador para ser empregado em análises de risco.

5 Conclusões

Neste projeto, objetivou-se analisar diferentes abordagens para análises de consequências de eventos de falha em um duto. Primeiramente, segundo a regulamentação CETESB [10], categorizou-se cada cenário de falha em três divisões, baseadas no tamanho do defeito: furo (5% de comprometimento do diâmetro nominal), perfuração (20% de comprometimento do diâmetro nominal) e ruptura total (100% de comprometimento do diâmetro nominal). Em sequência, executou-se o cálculo de volume vazado total no oleoduto para cada cenário de falha, o qual é estimado a partir da soma de duas parcelas: volume vazado durante a operação até a detecção do vazamento e a parada do bombeamento, e volume vazado associado ao perfil hidráulico do duto, também conhecido como volume vazado máximo gravitacional. Assim, a partir dos dados de volume vazado total, ao se aplicar o modelo de "incêndio em poça", obtiveram-se múltiplos raios de impacto condizentes com os níveis de dosagem térmica emitida pelas chamas.

A partir dos dados de dosagem térmica, foram avaliadas diferentes abordagens para a avaliação do número de fatalidades, partindo-se dos conceitos de classes de locação adaptados para oleoduto e contagem direta de habitações. Como resultado, a metodologia de contagem apresentou uma quantificação de fatalidades mais crítica do que o processo de densidade em todos os cenários de falha. A densidade populacional acaba por homogeneizar a distribuição habitacional na região do oleoduto (densidade média), enquanto o método de contagem afere a distância entre cada edificação nas redondezas em relação à diretriz do duto. Em suma, a configuração das habitações em relação ao oleoduto é fundamental para a determinação do grau de periculosidade caso haja um evento de falha, visto que populações mais próximas ao duto, apresentando menor distanciamento em relação à linha tronco do ativo, estão mais suscetíveis à exposição térmica em caso de incêndio; diferentemente de populações mais afastadas. Assim, a quantificação populacional por classe de locação (densidade populacional) pode ser um método mais conservador em regiões com baixa contagem de habitações, tornando-se mais adequada para avaliações de consequências em localidades onde o método de contagem não identifica habitações no entorno, sendo capaz de estimar possíveis vetores de

crescimento.

A partir das funções Probit selecionadas, inferiu-se que o equacionamento de TSAO&Perry, para todos os cenários de falha, estima uma maior probabilidade de fatalidades ao longo do duto quando comparada à formulação de Eisenberg; tanto para a metodologia de densidade populacional média quanto para a de contagem. Portanto, para todos os cenários de falha (5%, 20% e 100% de comprometimento de diâmetro nominal), o equacionamento de TSAO&Perry pode ser considerado uma formulação mais conservadora para análises de risco. Já em relação à quantificação de fatalidades, o método de aproximação linear apresentou probabilidades menores quando comparado à função Probit (TSAO&Perry) para a maioria das juntas analisadas.

Por fim, a partir de todas as análises realizadas, concluiu-se que o cálculo por contagem de habitações utilizando a função Probit (TSAO&Perry) como método estimativo de fatalidades é o mais conservador para ser empregado em análises de risco.

Referências bibliográficas

- [1] ABNT: *Projeto de sistemas de transmissão e distribuição de gás combustível*. Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT), 2002.
- [2] E. Palazzi, B. Fabiano: *Analytical modelling of hydrocarbon pool fires: Conservative evaluation of flame temperature and thermal power*. *Process Safety and Environmental Protection*, 90:121–128, 2012.
- [3] Company, Crane: *Flow of fluids through valves, fittings and pipe - introduction to plastics engineering*. (Crane Company - Technical Paper N° 410 M), 1982.
- [4] Pires, L. F. G., Barreto C. V.: *A spill volume calculation approach and its positive impacts on pipeline risk management*. *Proceedings of the 2024 14th International Pipeline Conference*, 2024.
- [5] M. Cech, J. Armstrong, W. Guijt A. Haskamp I. Huidobro Barrio: *Performance of European cross-country oil pipelines, Statistical summary of reported spillages in 2021 and since 1971*, Maio 2023.
- [6] Cunha, S. B.: *A review of quantitative risk assessment of onshore pipelines*. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, 44:282–298, 2016.
- [7] Rew, P. J. and W. G. Hulbert: *Development of pool fire thermal radiation model*, May 1996.
- [8] Freire, José L. F.: *Engenharia de Dutos*. ABCM Associação Brasileira de Engenharia e Ciências Mecânicas, 2009.
- [9] ASME: *Code for Pressure Piping, B31 Supplement to ASME B31.8.*, 2020.
- [10] CETESB: *Risco de Acidente de Origem Tecnológica - Método para decisão e termos de referência*. CETESB, Alto de Pinheiros, São Paulo - SP, 2011.
- [11] Eisenberg, N.A., Lynch C.J. Breeding R.J: *Vulnerability Model: A simulation system for Assessing Damage Resulting from Marine Spills.*, 1975.

- [12] Tsao C.K., Perry W.W: *Modifications to the Vulnerability Model: a Simulation Model for Assessing Damage Resulting from Marine Spills (vm4)*., 1979.
- [13] Muhlbauer, W. Kent: *Pipeline Risk Assessment: The Definitive Approach and Its Role in Risk Management*. Expert Publishing, LLC, 2015.
- [14] EGIG: *11th Report of the European Gas Pipeline Incident Data Group (period 1970 – 2019)*, 2020.
- [15] ASME: *Code for Pressure Piping, B31 Supplement to ASME B31.8.*, 2020.
- [16] ABNT: *Regulamento Técnico de Dutos Terrestres para Movimentação de Petróleo, Derivados e Gás Natural (RTDT)*. Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT), 2011.
- [17] TNO: *Methods for the calculation of physical effects, Third Edition, pp 2.63-2.80; 6.1-6.60.*, 2005.
- [18] Stephens, M.J.: *A model for sizing high consequence areas associated with natural gas pipelines*, 2000.