

INSTITUTO DE ENGENHARIA NUCLEAR

MARCELA FERREIRA DE FREITAS

**ESTUDO DE TRINCAS E CORROSÕES EM GASODUTOS USANDO
MEDIDAS DE TRANSMISSÃO E ESPALHAMENTO DE RAIOS GAMA**

Rio de Janeiro

Agosto de 2019

MARCELA FERREIRA DE FREITAS

**ESTUDO DE TRINCAS E CORROSÕES EM GASODUTOS USANDO
MEDIDAS DE TRANSMISSÃO E ESPALHAMENTO DE RAIOS GAMA**

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-graduação em Ciência e Tecnologia Nucleares do Instituto de Engenharia Nuclear da Comissão Nacional de Energia Nuclear como parte dos requisitos necessários para a obtenção do Grau de Mestre em Ciência e Tecnologia Nucleares.

Orientador: Prof. Dr. César Marques Salgado

Rio de Janeiro

Agosto de 2019

FREI Freitas, Marcela Ferreira

Estudo de trincas e corrosões em gasodutos usando medidas de transmissão e espalhamento de raios gama / Marcela Ferreira de Freitas. -- Rio de Janeiro: CNEN/IEN, 2019.

xiv, 64 f.: il.; 31 cm.

Orientador: César Marques Salgado

Dissertação (mestrado) – Instituto de Engenharia Nuclear, PPGIEN, 2019.

1. Gasoduto. 2. Trinca. 3. Corrosão. 4. Código MCNPX. 5. Transmissão. 6. Espalhamento Compton.

ESTUDO DE TRINCAS E CORROSÕES EM GASODUTOS USANDO MEDIDAS
DE TRANSMISSÃO E ESPALHAMENTO DE RAIOS GAMA

Marcela Ferreira de Freitas

DISSERTAÇÃO SUBMETIDA AO CORPODOCENTE DO PROGRAMA DE PÓS-
GRADUAÇÃO EM CIÊNCIA E TECNOLOGIA NUCLEARES DO INSTITUTO DE
ENGENHARIA NUCLEAR COMO PARTE DOS REQUISITOS NECESSÁRIOS PARA A
OBTENÇÃO DO GRAU DE MESTRE EM CIÊNCIA E TECNOLOGIA NUCLEARES

Aprovada por:

Prof. César Marques Salgado, D.Sc.

Prof. Cláudio Márcio do Nascimento Abreu Pereira, D.Sc.

Prof. Ademir Xavier da Silva, D.Sc.

RIO DE JANEIRO, RJ - BRASIL

AGOSTO DE 2019

Dedico este trabalho a Deus, pelas oportunidades que apareceram na minha vida. Dedico também a minha mãe, por sempre ter acreditado em mim e a minha filha pelo apoio, cumplicidade e paciência.

AGRADECIMENTOS

Gostaria de agradecer professor Dr. César Marques Salgado pela orientação deste trabalho, pela grande paciência, pela confiança em mim e por todas as colaborações deste trabalho. Muito obrigado por tudo.

Ao Instituto de Engenharia Nuclear (IEN) pelo conhecimento pela oportunidade e conhecimento técnico-científico adquirido para a realização deste trabalho.

Aos membros da banca pela atenção, pela disponibilidade de apreciar e de estarem presentes na defesa deste trabalho.

A minha família, em especial a minha mãe Solange Ferreira de Freitas, a minha irmã Patricia Ferreira de Freitas, meu marido Artur Sant'Ana da Costa e minha filha Ana Sophia por me apoiarem em todos os momentos da minha vida pessoal e profissional.

Aos colegas de trabalho, principalmente ao Anderson Penavilla pela colaboração para a realização deste trabalho.

Aos amigos no IEN pela ajuda e força que me deram para o desenvolvimento deste trabalho em especial Sophia Dam, Tâmara Porfíro Teixeira, William Luna Salgado, Ana Carolina e Carlos Pontes.

A amiga e torcedora Elane e Silva Granjeiro.

Meu muito obrigado a todos que direta ou indiretamente contribuíram para a realização deste trabalho.

RESUMO

A grande parte da produção de gás natural é transportada por meio de gasodutos, que necessitam de inspeções periódicas para avaliar a integridade estrutural dos dutos, devido a possíveis defeitos causados por degradação, que podem se romper provocando vazamento do fluido ocasionando desastres de grandes proporções. Com base nisto, este trabalho apresenta uma metodologia para detecção de trincas e corrosões em gasodutos. A aproximação é baseada nos estudos da transmissão e espalhamento de raios gama visando investigar possíveis falhas nos dutos. Para isso, foram especificados o diâmetro, a espessura e a composição o material do duto e do gás natural, assim como, a pressão interna de operação do gasoduto. Estudos preliminares para determinação das energias das fontes a serem utilizadas nas simulações foram realizadas, e a influência do duto e do gás natural nos feixes transmitidos e espalhados foram analisados. O sistema de detecção e dimensionamento da falha consistiu em duas geometrias, sendo a primeira para análise dos feixes transmitidos, utilizando uma fonte de raio de gama (^{137}Cs e ^{133}Ba) analisada separadamente, com um feixe estreito de 18° compreendendo a fonte e detector de NaI(Tl) 2x2", a segunda geometria para o estudo feixes espalhados utilizando um detector de NaI(Tl) 2x2" a 135° da fonte, mantendo o feixe estreito de 18° . Os dois modelos consistem em analisar as falhas realizando uma varredura ao redor do duto, para isso foi desenvolvida uma geometria para localização das falhas, utilizando técnicas de espalhamento com dois detectores a 90° da fonte de ^{137}Cs . Foram determinadas dimensões das corrosões e trincas, o possibilitou comparar os modelos criados e as fontes. O resultado obtido foi na detecção 15 mm de extensão de uma trinca de 2 mm de altura e 0,5 mm de abertura, utilizando a fonte de ^{133}Ba com energia de 80,998 keV no sistema de transmissão. As simulações foram realizadas utilizando o código MCNPX desenvolvendo uma geometria de contagem adequada para detecção das trincas e corrosões, por meio da atenuação dos feixes transmitidos e espalhados.

Palavras-chave: Gasoduto, Trinca e Fissura, Corrosão, Código MCNP-X, Transmissão, Espalhamento Compton.

ABSTRACT

Most of the natural gas production is transported through gas pipelines, which require periodic inspections to assess the structural integrity of the pipelines, due to possible defects caused by degradation, which can rupture causing fluid leakage causing major disasters. Based on this, this work presents a methodology for crack detection and pipeline corrosion. The approach is based on the study of the transmission and scattering of gamma rays to investigate possible pipelines failures. For this, the diameter, thickness and composition of the pipeline and natural gas material were specified, as well as the internal operating pressure of the pipeline. Preliminary studies to determine of the sources energies to be used in the simulations were performed, and the influence of the pipeline and natural gas in the transmitted and scattered beams were analyzed. The failure detection and measuring system consisted of two geometries, the first for analysis of transmitted beams using a separately analyzed gamma ray source (^{137}Cs and ^{133}Ba) with an 18° narrow beam comprising the source and detector of NaI (Tl) 2x2", the second geometry for the study of scattered beams using a 2x2" NaI (Tl) detector at 135° from the source while maintaining the narrow beam of 18° . The two models consist of analyzing the failure by scanning around the pipeline. For this, a geometry was developed to locate the failures using two-detector scattering techniques at 90° from the ^{137}C source. Corrosion and cracks dimensions were determined, making it possible to compare the created models and the sources. The result was detection of a 15 mm extension of a 2 mm high crack using the source ^{133}Ba with 80.998 keV power in the transmission system. The simulations were performed using the MCNPX code developing a suitable counting geometry for crack and corrosion detection by attenuation of transmitted and scattered beams.

Keywords: Gas pipeline, Cracks, Corrosion, MCNP-X Code, Transmission, Compton Scattering.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1: Oferta Interna de Energia Elétrica por Fonte em 2017.	1
Figura 2: Rompimento de gasodutos ocasionado por corrosão: (a) Gasoduto operada pela Columbia Gas Transmission Corporation, localizado em Sissonville (NTSB, 2014) e (b) Gasoduto Transcontinental – Transco, localizado em Appomattox (PHMSA, 2008).	2
Figura 3: Infraestrutura de produção e movimentação de gás natural.	3
Figura 4: Distribuição dos Incidentes no período entre 2007 e 2016 - Adaptado.	3
Figura 5: Ferramenta para inspeção do duto, PIG.	4
Figura 6: Estado de tensão do cilindro a uma pressão interna constante.	9
Figura 7: Propagação da Trinca	11
Figura 8: Distribuição qualitativa de tensões para uma placa plana tracionada.	11
Figura 9: Modos de abertura de uma trinca.	12
Figura 10: Representação esquemática da corrosão do aço em solo neutro areado.	13
Figura 11: Corrosão Uniforme	14
Figura 12: <i>Pite</i> em placa.	14
Figura 13: Corrosão por placas.	15
Figura 14: Corrosão alveolar.	15
Figura 15: Proteção Catódica pelo método de corrente Impressa.	17
Figura 16: Fator de compressibilidade do gás natural - Gráfico de Standing-Katz	21
Figura 17: Modos de interação da radiação com a matéria.	22
Figura 18: Efeito Fotoelétrico.	24
Figura 19: Efeito Compton.	24
Figura 20: Efeito Produção de Pares.	26
Figura 21: Tipo de Interação em função da energia do fóton e do número atômico.	27
Figura 22: Análise dos feixes transmitidos e espalhados em diferentes energias de radiação gama.	33
Figura 23: Avaliação da influência do duto de aço carbono nos feixes transmitidos e espalhados.	34
Figura 24: Medidas das corrosões simuladas, modificando a largura.	34
Figura 25: Medidas das corrosões simuladas, modificando a espessura.	35
Figura 26: Medidas das trincas simuladas.	36
Figura 27: Geometria para estudo dos feixes transmitidos.	37
Figura 28: Geometria para estudo dos feixes espalhados.	37
Figura 29: Determinação da localização da corrosão no gasoduto: (a) 0°, (b) 30°, (c) 45°, (d) 90°, (e) 180° e (f) sem corrosão.	38
Figura 30: Coeficiente de Atenuação em Massa em função da Energia.	39

Figura 31: Fótons transmitidos detectados pelo detector de NaI(Tl) a 180° da fonte, utilizando as fontes de(a) Amerício-241, (b) Bário-133, (c) Irídio-192 e (d) Césio-137.....	40
Figura 32: Fótons espalhados detectados e pelo detector de NaI(Tl) a 135° da fonte, utilizando as fontes de (a) Amerício-241, (b) Bário-133, (c) Irídio-192 e (d) Césio-137.....	41
Figura 33: Influência do duto de aço carbono, com a fonte de Bário-133.....	43
Figura 34: Influência do duto de aço carbono, com a fonte de Césio-137.....	43
Figura 35: Análise dos feixes espalhados com a fonte de Césio-137 (a) ângulos em relação ao centro duto (b) ângulos analisados para validação do resultado.....	44
Figura 36: Estudo do espalhamento com dois blocos de aço carbono. (a) fótons espalhados detectados pelo detector a 135° da fonte no bloco B1 e B2 (b) comparação com o duto.....	44
Figura 37: Estudo do espalhamento com dois blocos de aço carbono. (a) fótons espalhados detectados pelo detector a 90° da fonte no bloco B1 e B2 (b) comparação com o duto.....	45
Figura 38: Influência do gás natural, com a fonte de Bário-133.....	46
Figura 39: Influência do gás natural, com a fonte de Césio-137.....	46
Figura 40: Comportamento dos fótons a um utilizando feixe estreito de 18°.....	47
Figura 41: Fótons transmitidos em função da largura da corrosão.....	48
Figura 42: Fótons transmitidos utilizando em função da espessura da corrosão.....	48
Figura 43: Fótons transmitidos detectados nos fotopicos em função largura da corrosão.....	49
Figura 44: Fótons transmitidos detectados nos fotopicos em função espessura da corrosão.....	49
Figura 45: Relação entre os fótons transmitidos detectados nos fotopicos em função da perda do material carbono em cm ³ . (a) Fonte de Bário-133 (b) Fonte de Césio-137.....	50
Figura 46: Relação entre os fótons transmitidos detectados nos fotopicos em função da extensão da trinca no material carbono, utilizando as fontes: (a) Bário-133 e (b) Césio-137.....	50
Figura 47: Fótons Espalhados em função da largura da corrosão detectados pelo detector a 135° das fontes: (a) Bário-133 (b) Césio-137.....	52
Figura 48: Fótons Espalhados em função da espessura da corrosão detectados pelo detector a 135° das fontes: (a) Bário-133 (b) Césio-137.....	52
Figura 49: Fótons espalhados detectados nos fotopicos em função largura da corrosão.....	53
Figura 50: Fótons espalhados detectados nos fotopicos em função espessura da corrosão.....	53
Figura 51: Relação entre os fótons espalhados detectados nos fotopicos em função da perda do material carbono em cm ³ (a) Fonte de Bário-133 (b) Fonte de Césio-137.....	54
Figura 52: Relação entre os fótons espalhados, detectados nos fotopicos em função da extensão da trinca no material carbono, utilizando a fonte Césio-137.....	55
Figura 53: Espectro do detector D1, para análise da localização da falha no gasoduto.....	55
Figura 54: Número de contagens dos fótons espalhados detectados pelos detectores em função da falha (a) Detector 1 e (b) Detector 2.....	56

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Propriedade constituinte do Gás Natural.....	18
Tabela 2: Composição química de uma amostra de gás natural.....	32
Tabela 3: Composição química de um aço API 5L Gr B	32
Tabela 4: Atenuação dos feixes transmitidos no Fotopico (I/I_0).....	41
Tabela 5: Energia do fóton espalhado teórico e simulado.....	42
Tabela 6: Energia do Fóton espalhado teórico e simulado utilizando dois blocos de aço carbono API 5L Gr B e fonte de Césio-137.	45
Tabela 7: Números de contagens considerando a incerteza, dos fótons transmitidos detectados pelo detector, em função da extensão da trinca.	51

LISTA DE SIGLAS E ABREVIACÇÕES

AIEA: Agência Internacional de Energia Atômica (International Atomic Energy Agency – IAEA)

CNEN: Comissão Nacional de Energia Nuclear

DAP: Distribuição de Altura de Pulsos

IEN: Instituto de Engenharia Nuclear

MCNPX: Monte Carlo N-Particle eXtended: Código computacional para transporte de nêutron e fóton (computer code for nêutron photon transport)

NaI(Tl): Detector cintilador de Iodeto de Sódio dopado com Tálcio

PIG: Pipeline Inspection Gauge

MFL: Magnetic Flux Leakage

BEM: Balanço Energético Brasileiro

PHMSA: Pipeline and Hazardous Materials Safety Administration

ANP: Agência Nacional de Petróleo.

SUMÁRIO

CAPÍTULO I.....	1
1. INTRODUÇÃO.....	1
1.1 MOTIVAÇÃO.....	6
1.2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	6
1.3 OBJETIVO	8
CAPÍTULO II.....	9
2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	9
2.1 TRINCA EM DUTO	9
2.2 CORROSÃO EM DUTO	12
2.2.1 Formas de corrosão.....	14
2.3 CARACTERÍSTICAS FÍSICAS DOS GASES	17
2.3.1 Propriedades Críticas.....	19
2.3.2 Propriedades Reduzidas e Estados Correspondentes.....	19
2.3.3 Equação de Clapeyron para Gases Reais.....	20
2.4 INTERAÇÃO DA RADIAÇÃO COM A MATÉRIA	21
2.4.1 Interação da radiação eletromagnética com a matéria.....	22
2.4.2 Atenuação de feixe transmitidos.....	27
2.5 CODIGO MCNPX	29
CAPÍTULO III	31
3 METODOLOGIA.....	31
3.1 DEFINIÇÃO DO DUTO E DA COMPOSIÇÃO DO GÁS NATURAL	31
3.2 DETERMINAÇÃO DA ENERGIA DA FONTE DE RADIAÇÃO.....	32
3.3 AVALIAÇÃO DA INFLUÊNCIA DO DUTO E DO GÁS NATURAL NAS SIMULAÇÕES.....	33
3.4 DETERMINAÇÃO DA FALHA NOS DUTOS.....	34
3.4.1 Determinação da corrosão.	34
3.4.2 Determinação da Trinca.....	35
3.4.3 Estudo dos feixes transmitidos e espalhados para detecção de diferentes espessuras de corrosões e trincas.....	36
3.4.4 Determinação da localização da corrosão na circunferência do duto.....	38
CAPÍTULO IV	39

4	RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	39
4.1	DEFINIÇÃO DA ENERGIA DA FONTE DE RADIAÇÃO	39
4.1.1	Potencialidade do código no cálculo de espalhamento.	42
4.2	INFLUÊNCIA DO DUTO NO RESULTADO DAS SIMULAÇÕES	42
4.3	AVALIAÇÃO DA INFLUÊNCIA DO GÁS NATURAL.....	45
4.4	ESTUDO DAS FALHAS	47
4.4.1	Análise das corrosões utilizando feixes transmitidos.	47
4.4.2	Análise das trincas utilizando feixes transmitidos.	50
4.4.3	Análise das corrosões utilizando feixes espalhados	51
4.4.4	Análise das trincas utilizando feixes espalhados	54
4.4.5	Determinação da localização da corrosão na circunferência do duto.	55
	CAPÍTULO V	57
5	– CONCLUSÕES	57
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	59

CAPÍTULO I

1. INTRODUÇÃO

Devido à crescente demanda, o gás natural é uma fonte de energia que vem apresentando crescimento na matriz energética do Brasil, com utilização na indústria, nas termoeletricas, nas residências e nos veículos automotores. O desenvolvimento desta matriz é fundamental para que as indústrias se tornem competitivas visando aumentar a eficiência operacional e reduzir custos. Para tal, são necessários investimentos na ampliação da rede de transporte e na distribuição deste energético.

A partir da Conferência Mundial das Nações Unidas (RIO-92) e cinco anos depois, em 1997, com o Protocolo de Quioto, o componente ambiental ganhou maior importância. Nesse contexto, o gás natural tornou-se mais atrativo, em relação às fontes de energia concorrentes, devido, principalmente, às suas menores taxas de emissão de gases de efeito estufa (CH₄, CO₂, entre outros) (VAZ *et al.*, 2008).

De acordo com o Balanço Energético Nacional 2018 (BEN, 2018), ano base 2017, o gás natural representou cerca de 10,5% da matriz energética brasileira, como pode ser visto na Figura 1.

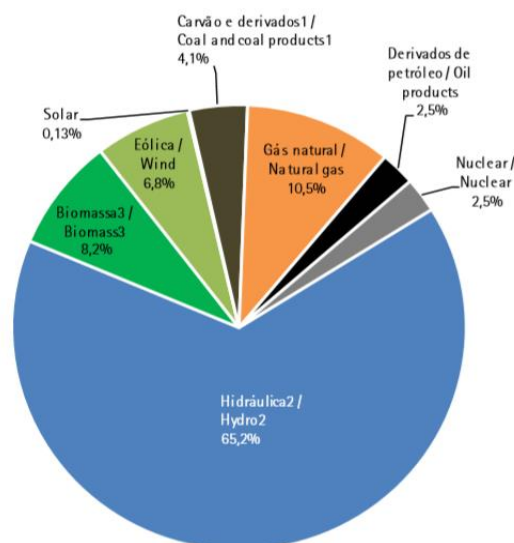


Figura 1: Oferta Interna de Energia Elétrica por Fonte em 2017.
(BEN, 2018)

A média diária de produção de gás natural do ano de 2017 foi de 109,9 milhões de m³/dia e o volume de gás natural importado foi de 29,4 milhões de m³/dia. A participação do gás natural na matriz energética nacional chegou a patamares de 12,9%. A demanda industrial por gás natural avançou de 1,4% em relação ao ano de 2016, devido principalmente ao crescimento da atividade siderúrgica. O consumo de gás natural na geração térmica aumentou 15,3% (BEN, 2018).

Grande parte da produção de gás natural é transportada por meio de gasodutos que necessitam de inspeções periódicas para avaliar a integridade estrutural dos dutos devido a possíveis defeitos causados por degradação, que podem se romper provocando vazamento do fluido ocasionando desastres ambientais de grandes proporções com prejuízo para população e para a economia da região local. Enquanto as degradações dos dutos, não pode ser totalmente evitada, pode ser controlada a fim de que os problemas não alcancem a severidade como mostrado na Figura 2.

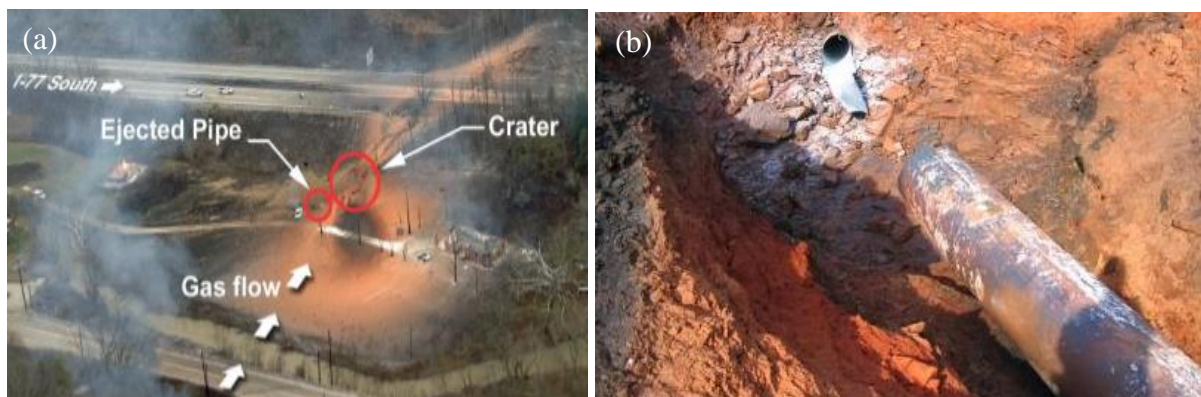


Figura 2: Rompimento de gasodutos ocasionado por corrosão: a) Gasoduto operada pela Columbia Gas Transmission Corporation, localizado em Sissonville (NTSB, 2014); b) Gasoduto Transcontinental – Transco, localizado em Appomattox (PHMSA, 2008).

O Brasil possui aproximadamente 9.748 km de extensão de gasodutos, sendo 7.155 km operado pela TRANSPETRO, com capacidade de 105 milhões de m³/dia, interligando a região nordeste ao sudeste do país (TRANSPETRO, 2018) e 2.593 km operados pela TBG, com capacidade de 40 milhões de m³/d, interligando o país Bolívia ao Mato Grosso do Sul, São Paulo e toda a região do Sul do País (TBG, 2018). Na figura 3, está representado os gasodutos existentes no Brasil.



Figura 3: Infraestrutura de produção e movimentação de gás natural. (ANP, 2016)

Dados de incidentes coletados ao longo de mais de 142.790 quilômetros de gasodutos foram obtidos por empresas especializadas do setor de transporte do gás natural da Europa, no período compreendido entre 2007 e 2016, revelam que a corrosão é uma das principais causas de incidentes, correspondendo a 25%, conforme ilustrado na Figura 4.



Figura 4: Distribuição dos Incidentes no período entre 2007 e 2016 - Adaptado. (EGIG, 2018)

Utilizando tecnologia convencional para realizar medidas preventivas ou corretivas, a detecção de trincas e perdas de espessuras pode ocorrer pela monitoração interna de dutos por diversas técnicas, tais como: por “PIGs” (Pipeline Inspection Gauge) instrumentados, baseados em magnetismo, é a ferramenta mais difundida para inspeção de corrosão de dutos, por meio da utilização da alteração do campo magnético para detectar mudanças na espessura do duto (Silva, 2015) e EMAT (Electro Magnetic Acoustic Transducers) que é a mais indicada para detecção de trincas em gasodutos (Camerini, 2018). Na figura 5 é apresentada uma imagem de um Magnetic Flux Leakage (PIG MFL) utilizado pela indústria, com amplo histórico de sucesso em operações em duto, para detecção de falhas em dutos (Freire, 2009).

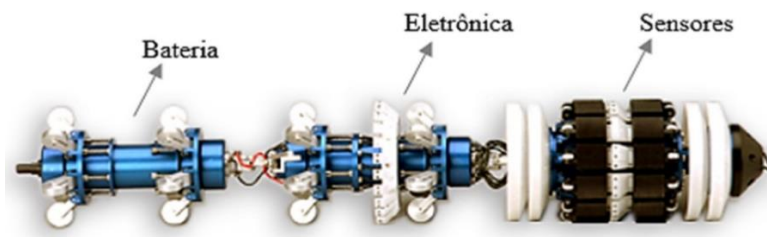


Figura 5: Ferramenta para inspeção do duto, PIG.

(Camerini, 2018)

No entanto, a passagem deste PIG possui algumas desvantagens, os quais são:

- i) Necessidade de uma instalação física para lançar e receber o PIG instrumentado no duto. Alguns ramais de pequenas distâncias, que interligam os gasodutos principais às instalações de entrega de gás para as companhias distribuidoras locais, não possuem estas instalações.
- ii) Necessidade de velocidade mínima e máxima para o deslocamento no fluido.
- iii) Alguns dutos não possuem escoamento suficiente para possibilitar a passagem do PIG dentro dos limites de velocidade determinado pelo PIG instrumentado.
- iv) Possíveis amassamentos na linha podem impossibilitar a sua passagem, sendo necessário interromper o transporte do gás natural, gerando enormes custos à empresa.

No contexto das Técnicas Nucleares, a densitometria de raios gama está baseada na mudança de atenuação da radiação gama causada pela presença de discontinuidades interna ou externa, quando a radiação passa pelo material e é registrada por detectores específicos. Esta técnica tem sido aplicada satisfatoriamente em muitas áreas, tais como: petroquímica, indústria petrolífera e mineração. Ela tem sido usada para medidas de fluxos (Mi *et al.*, 1998; Salgado

et al., 2009, 2010); predição de densidade (Achmad e Hussein, 2004; Jahanbakhsh et. al., 2013); medidas de espessura (Berman e Harris, 1954); aplicações de monitoração de transporte de petróleo (Khorsandi e Fegghi, 2011, 2013); detecção de incrustação e corrosão em tubulações usadas para extração de petróleo (Monno, 1985; Drake e Seward, 1989); inspeção de superfícies de dutos (Anjos *et al.*, 1989) e identificação de depósitos de parafinas em tubulações de petróleo (Lopes, 1997).

No entanto, são encontradas dificuldades, tais como: extensão e grande diâmetro das tubulações, presença de fluidos que devido às diferenças na densidade interferem com a precisão da estimativa da densidade. Existe, então, uma necessidade de avaliar o comportamento/interação do feixe de radiação no cenário mais realístico possível, ou seja, considerando a influência destes parâmetros. A análise por medidas de transmissão pode ser alcançada por comparação dos sinais registrados pelo(s) detector(es) com um conteúdo de uma tabela de calibração de densidades ou com a utilização de equações analíticas. De qualquer forma, a tabela de calibração pode ser influenciada por parâmetros importantes que dependem das condições de medidas, tais como: diâmetro do duto, espessura das paredes do duto, temperatura e pressão, e até mesmo erros causados no próprio procedimento de calibração (Maucec e Denijs, 2009). Em contraste, no espalhamento Compton, o detector e a fonte podem ser dispostos do mesmo lado da amostra e uma imagem/dados da secção transversal do duto pode ser diretamente obtida a partir da radiação espalhada (Sharaf, 2001). Os fótons espalhados isoladamente a partir de um volume bem definido de uma amostra contêm as informações sobre a densidade do material em análise (Arendtsz e Hussein, 1995).

A detecção das trincas e corrosões por medidas da atenuação de radiação gama de transmissão e espalhamento podem ser obtidas pela mudança do número de contagens de transmissão e espalhamento registrados pelo detector. Para esta contagem os modelos serão desenvolvidos usando o código matemático MCNPX (Pelowitz, 2005) baseado em simulações por meio do método de Monte Carlo para desenvolver uma geometria de contagem adequada para detecção das trincas e perdas de espessuras ocasionadas por corrosões.

1.1 MOTIVAÇÃO

Grande parte da produção de gás natural é transportada por meio de gasodutos tornando necessárias ações periódicas de manutenção para avaliar a integridade estrutural dos dutos devido a possíveis defeitos causados por fadiga e corrosão que podem se romper provocando vazamento do fluido elevando a probabilidade de prejuízos para as pessoas, meio ambiente e econômica. Esta prevenção é realizada por PIG's instrumentados, que são lançados periodicamente para análise das falhas, no entanto, os dutos de interligação com as estações de entrega para a distribuidora de gás e alguns ramais, não possuem instalações para lançamento e recebimento de PIG. Esta situação mostra a necessidade de desenvolver metodologias para identificação de falhas destes dutos, cujos os diâmetros nominais são menores que os gasodutos principais e possuem pequenas extensões, garantindo desta forma, a segurança e a continuidade operacional de entrega de gás natural. Dispositivos e metodologias que permitam o controle deste parâmetro é de grande interesse, independentemente da presença dos fluidos e características do duto, tornando a operação mais segura e eficiente.

1.2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Diversos trabalhos ilustram o sucesso da aplicação de técnicas nucleares utilizadas na área industrial. A grande vantagem desta técnica é a possibilidade de serem efetuadas análises em tempo real e sem a necessidade de interrupção da operação normal da instalação (técnicas não invasivas), apresentando confiabilidade nos resultados.

SILVA *et al.* (1999) realizou estudo para detecção de defeitos superficiais em dutos, utilizando a técnica de espalhamento Compton. O estudo consistiu na detecção de defeitos ao longo o duto, realizando varredura em torno do eixo central. Com este estudo foi possível detectar corrosão de 2 mm em tubo de diâmetro de 77,3 mm com uma parede de espessura de 6,3 mm.

SHARAF (2001) determinou a distribuição de densidade dentro de um objeto utilizando a técnica de espalhamento Compton. A técnica é baseada na variação da contagem dos fótons

de raios X espalhados para determinar a variação da densidade do objeto, utilizando o processo de varredura ao longo do objeto.

GOLGOUN *et al.* (2016) realizou um estudo de um novo modelo combinando as técnicas nucleares de espalhamento e transmissão para a medição de densidade, desenvolveu equações relacionando a densidade com os resultados obtidos. Foi utilizado o código MCNP4C para simulação do modelo criado.

BEIGZADEH *et al.* (2013) utilizou técnicas nucleares de transmissão e espalhamento para determinação do produto petrolíferos por meio da medição da densidade. A medição foi baseada na absorção da radiação gama quando ela atravessa o material do processo. Sendo a absorção proporcional às mudanças na densidade do material indicando, assim, a densidade do produto.

NAZEMI *et al.* (2018) propôs uma solução de medir a espessura de chapas metálicas com várias ligas, utilizando técnicas nucleares de transmissão. A metodologia que foi proposta, pode prever a espessura da folha de alumínio independente do seu tipo de liga com um erro menor que 0,04 cm.

MARGRET *et al.* (2018) investigou a corrosão interna de um aço, utilizando as técnicas de espalhamento e transmissão de raios gama. Foi realizado varredura ponto a ponto para determinar a espessura do objeto de teste conhecido. Medições experimentais e seus resultados confirmam detecção da corrosão interna até 4 mm de profundidade.

DRAKE e SEWARD (1989) desenvolveram um sistema para detecção de corrosão em dutos com revestimento através de fonte de raios X ou radiação gama, o detector foi mantido fixo sobre o anel de engrenagem móvel possibilitando a análise radial do duto. Este conjunto também foi mantido sobre um trilho fixo ao duto, que proporcionou a varredura axial.

ASTUTO (1995) realizou um estudo de inspeção de dutos utilizando a técnica de transmissão de raios gama através de uma fonte de Césio-137 e um detector cintilador alinhados sobre uma plataforma que se deslocava em movimento linear realizando a varredura na seção transversal do duto.

ALMEIDA (2011) realizou uma análise das falhas por fadiga e corrosão e gerenciamento de riscos associados aos dutos de Gás Natural a alta pressão. Identificando as causas das falhas na tubulação e dos possíveis cenários.

IAEA (2005) desenvolveu de um protocolo para avaliação de corrosão e depósitos utilizando a radiografia. Raios X ou gama são projetados no duto examinado e a intensidade da radiação transmitida através do duto é gravada usando um filme fotossensível, amplamente conhecido como filme industrial de raios X. As possíveis imperfeições são indicadas, com mudança da densidade no filme da mesma maneira que um raio X utilizado na área médica.

CRUVINEL e BALOGUN (2006) realizou estudo de medição de densidade e da umidade de amostras de solo, utilizando a técnica de espalhamento Compton. Foram utilizadas duas fontes radioativas, uma de ^{137}Cs para medições da densidade do solo e outra de ^{231}Am para medidas de teor de água.

TEIXEIRA (2018) realizou estudo de predição e medição da espessura de incrustação em dutos de petróleo, utilizando técnicas transmissão e espalhamento Compton. Com base nos resultados obtidos pelo código do MCNPX, desenvolveu modelos teóricos e utilizou para o treinamento, teste e validação das redes neurais artificiais.

1.3 OBJETIVO

O objetivo deste trabalho é desenvolver um método baseado em densitometria gama para prever trincas e corrosões em gasodutos. Tendo como etapas para atingir o objetivo:

- 1) Estudar a geometria de medição (fonte/detector/colimador) com feixe transmitido e espalhado usando o código MCNP-X;
- 2) Estudar as energias das fontes a serem utilizadas nas simulações;
- 3) Estudar as trincas e as corrosões;
- 4) Predizer a menor trinca e corrosões determinada nas simulações;
- 5) Estudar a localização da falha no duto, através de técnica de espalhamento.

CAPÍTULO II

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Neste capítulo serão descritas as fundamentações teóricas necessárias para compreensão acerca da metodologia proposta neste trabalho. Serão abordados os seguintes temas: Trincas e Corrosões em Dutos, Características Físicas dos Gases, Fundamentos da Radiação e sua interação com a matéria e Modelagem Matemática pelo método de Monte Carlo.

2.1 TRINCA EM DUTO

Na construção dos dutos, os mesmos são submetidos a esforços mecânicos oriundos da pressão hidrostática interna (teste hidrostático), igual ou superior a 1,25 vezes a pressão máxima de operação admissível (PMOA), conforme estabelecido pela norma ASME B31.4 (Freire, 2009). Os dutos são projetados para operarem em regime elástico, com fatores de segurança definido pela norma Internacional Americana de Petróleo API 5L (“*Specification for LinePipe*”).

Considerando o duto íntegro, com carregamento apenas pela pressão interna e sem interferência externa, pode-se calcular o estado de tensão do duto (Santos, 2005). Conforme ilustrado na Figura 6, as tensões σ_1 e σ_2 representam as tensões principais que coincidem respectivamente com a direção circunferencial e axial do tubo, a tensão radial é $\sigma_3 = 0$.

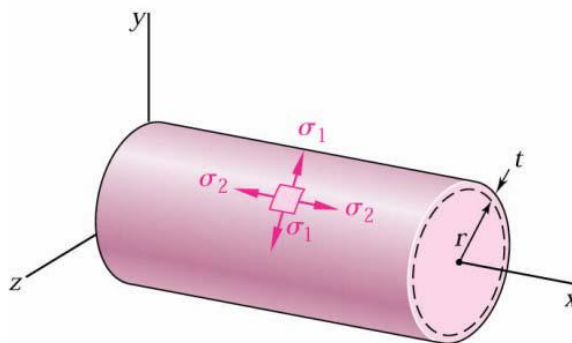


Figura 6: Estado de tensão do cilindro a uma pressão interna constante.
(Santos, 2015).

Durante a operação, os dutos ficam sujeitos a cargas de pressões cíclicas, ocasionadas pela variação da pressão interna no duto e carregamentos externos. Essa alternância de pressão produz tensões variáveis nos tubos que podem levar a peça à ruptura por fadiga. Uma vez conhecida a tensão do material determinada no teste hidrostático, às falhas estáticas são relativamente fáceis de serem previstas, no entanto, quando uma estrutura está submetida a tensões alternadas e cíclicas, esta pode vir a romper mesmo quando submetida a uma tensão inferior a tensão máxima do material, ocorrendo a falha por fadiga. Esse tipo de falha é ocasionado primariamente pela aplicação repetida de cargas variáveis, cuja principal consequência é gerar e/ou propagar uma trinca até uma eventual fratura do componente (Santos, 2015).

Os gasodutos estão sujeitos constantemente às pressões cíclicas, pois o armazenamento do gás natural é realizado no próprio gasoduto. Durante o baixo consumo, os gasodutos operam a pressões maiores e durante o elevado consumo, os gasodutos operam com pressões inferiores, este ciclo ocorre diariamente, os quais o baixo consumo ocorre durante a noite e o elevado consumo ocorre durante o dia.

O mecanismo de falha por fadiga pode ser dividido em 3 estágios:

- i) No estágio I, o tamanho da trinca é da ordem de grandeza muito pequena (Forsyth, 1962). Nesta etapa ocorre o crescimento de micro trincas, evoluindo para as primeiras macros trincas.
- ii) No estágio II, ocorre o crescimento das macro trincas até um tamanho crítico, no qual a trinca se propaga de forma estável, perpendicularmente à máxima tensão normal.
- iii) No estágio III é o momento que a propagação das trincas se torna catastrófica, ocorrendo a falha do componente mecânico, conforme apresentado na Figura 7.

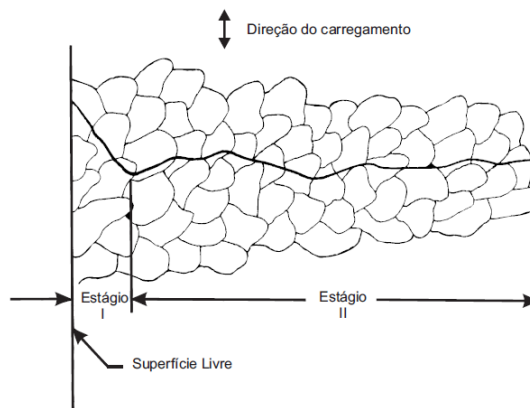


Figura 7: Propagação da Trinca
(Santos, 2015).

Nos casos de defeitos pré-existent no duto, geradas tanto pelo processo de fabricação, instalação (solda dos dutos), quanto pelo processo de operação, pode levar à falha por fadiga sem passar pelas etapas acima citadas. A forma que inicia a trinca depende da geometria, do material que o duto foi desenvolvido/fabricado, e do carregamento externo (pressão do solo sobre o duto) que o duto está sujeito. A presença de mossas (amassamentos) no duto pode modificar o comportamento, e em função da concentração de tensão, pode levar à fadiga (Santos, 2005).

Na Figura 8 é apresentada a distribuição qualitativa de tensões em placa tradicional. Nesta figura são mostradas as regiões com estado de tensão perturbado e não perturbados pela presença da trinca. É possível observar as condições de contorno e equilíbrio imposto pela parede livre da trinca, fazendo que as tensões atuantes (normal e cisalhantes) sejam nulas. Por outro lado, no volume de material próximo a raiz da trinca, as tensões são extremamente altas (Freire, 2009).

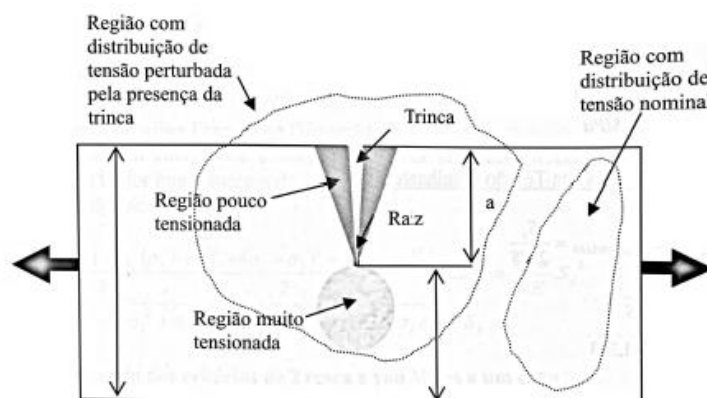


Figura 8: Distribuição qualitativa de tensões para uma placa plana tracionada.
(Freire, 2009).

Existem três modos de trincas, conforme ilustrados na Figura 9. A trinca mais estudada, por ser a mais crítica e comum, é o modo de abertura I. Este é modo de trinca que será analisada neste trabalho (Freire, 2009).

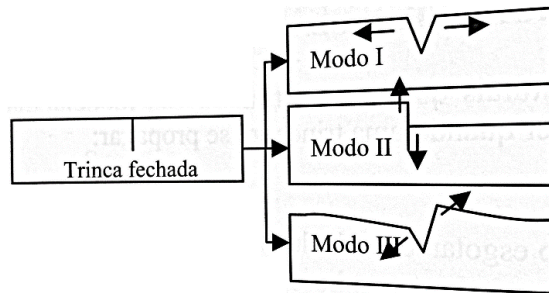


Figura 9: Modos de abertura de uma trinca.

(Freire, 2009).

- i) No Modo I, a carga principal é de tração aplicada normal ao plano da trinca, pelo qual tende a abrir a trinca.
- ii) No Modo II, corresponde a cargas de cisalhamento no plano e tende a deslocar uma face da trinca com relação a outra.
- iii) No Modo III, refere-se às cargas de corte ou cisalhamento normais ao plano, o deslocamento das superfícies da trinca é paralelo a elas.

2.2 CORROSÃO EM DUTO

Corrosão é a deterioração de um material, geralmente metálico, por ação química ou eletroquímica do meio ambiente aliada ou não a esforços mecânicos. A deterioração, causada pela interação físico-química entre o material e o seu meio operacional, representa alterações prejudiciais indesejáveis sofridas pelo material, tais como desgaste, variações químicas ou modificações estruturais tornando-o inadequado para seu uso (Gentil, 2007).

A corrosão química ocorre pela interação direta do metal com o meio fluido. A corrosão eletroquímica ocorre em temperatura ambiente, na presença de água e é devido à formação de uma pilha de corrosão, composta por uma região anódica e uma região catódica (Freire, 2009).

A corrosão externado duto, está relacionada a agressividade do solo aos metais. Os solos por mais seco que se apresentem, possuem água que funcionam como um eletrólito. Na região catódica, ocorre a reação de redução de espécies por meio do consumo dos elétrons gerados na região anódica, conforme apresentado na Figura 10 e Equações 1 e 2.

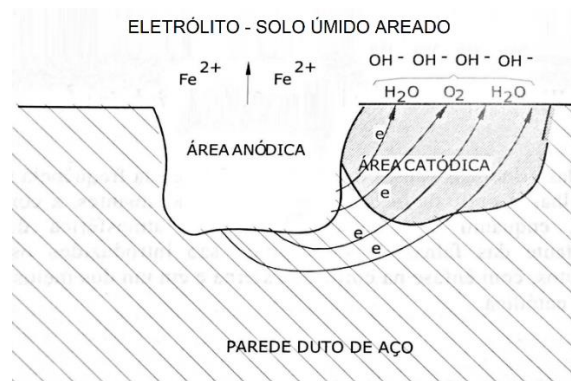


Figura 10: Representação esquemática da corrosão do aço em solo neutro areado.
(Freire, 2009)



Nas corrosões internas, o meio corrosivo é o próprio fluido do duto, que influenciam no processo de corrosão, os quais são: temperatura, concentração, impurezas, umidade, velocidade. Na região interna dos dutos de óleo e gás, a presença de dióxido de carbono CO_2 , sulfeto de hidrogênio H_2S e água podem causar sérios problemas de corrosão (Freire, 2009). O aumento da temperatura, assim como o aumento da umidade, gera a corrosão eletroquímica que agrava a corrosão. A velocidade alta do fluido pode retirar a camada superficial do duto ocasionando a corrosão.

O gás natural comercial é transportado dentro das especificações estabelecidas pela Resolução ANP N° 16 de 2018 (*Agencia Nacional de Petróleo*), apesar de ser um gás especificado e seco, ou seja, a umidade é controlada através do controle de ponto de orvalho pelas unidades de processamento, contem impurezas como o dióxido de carbono CO_2 , sulfeto de hidrogênio H_2S e outros componentes de pequenas proporções, que favorecem a ocorrência de corrosão nos gasodutos.

2.2.1 Formas de corrosão

A corrosão pode ocorrer sob diferentes formas e o conhecimento das mesmas é muito importante no estudo dos processos corrosivos. As formas de corrosão podem ser apresentadas considerando-se a aparência ou forma de ataque, além de seus mecanismos (Gentil, 2003).

Corrosão Uniforme: É a forma menos agressiva de corrosão. A corrosão se estende de forma homogênea sobre toda a superfície metálica, a penetração média é igual em todos os pontos, com conseqüente diminuição de espessura (Silva e Oliveira, 2013), conforme ilustrado na figura 11.



Figura 11: Corrosão Uniforme
(Silva e Oliveira, 2013)

Corrosão por Pite: Processo de corrosão em pontos ou em pequenas áreas localizadas na superfície metálica produzindo pites, que se tratam de cavidades que apresentam o fundo em forma angulosa e profundidade geralmente maior do que o seu diâmetro (Silva e Oliveira, 2013), conforme observado na figura 12.

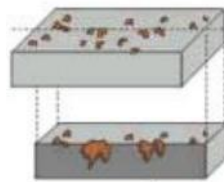


Figura 12: *Pite* em placa.
(Silva e Oliveira, 2013)

Corrosão por Placas: A corrosão localiza-se em regiões da superfície metálica e não em toda a sua extensão, formando placas com escavações (Silva e Oliveira, 2013), de acordo com a figura 13.

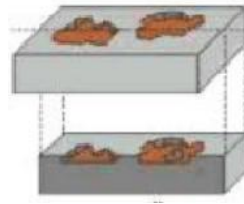


Figura 13: Corrosão por placas.

(Silva e Oliveira, 2013)

Corrosão Alveolar: A corrosão processa-se na superfície metálica produzindo sulcos ou escavações semelhantes a alvéolos, apresentando fundo arredondado e profundidade geralmente menor que o seu diâmetro (Silva e Oliveira, 2013), conforme visto na figura 14.

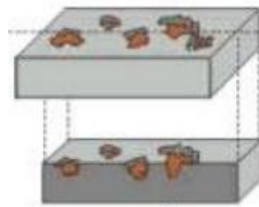


Figura 14: Corrosão alveolar.

(Silva e Oliveira, 2013)

Corrosão sob tensão: A corrosão sob tensão acontece quando um material, submetido a tensões de tração (aplicadas ou residuais), é colocado em contato com um meio corrosivo específico. As condições do duto, como dureza, encruamento, fases presentes, são fatores decisivos. As tensões podem ser mecânicas ou residuais, provocadas por tratamentos térmicos, trabalho a frio, entre outros (Silva e Oliveira, 2013).

Algumas proteções podem ser adotadas para evitar a corrosão sob tensão, os quais são: baixar a tensão de tração a um valor menor que a crítica, utilização de ligas menos suscetíveis, proteção catódica e adição de inibidores.

Para as simulações das geometrias realizadas no código MCNPX, foram consideradas as corrosões uniformes.

2.2.2 Técnicas de proteções das corrosões em dutos

A corrosão externa advém de danos no revestimento associados à falha na proteção catódica do duto, já a corrosão interna, é uma consequência da presença de água e impurezas no produto transportado. Para prevenir estas corrosões, algumas técnicas são adotadas:

Revestimento: Os dutos enterrados devem possuir revestimento externo para proteção contra corrosão. Esse revestimento representa a primeira barreira contra a corrosão externa, pois trata-se da interposição de uma camada entre a estrutura metálica e o meio corrosivo, formando uma película protetora contra a corrosão, impedindo o contato entre o duto e o eletrólito. No entanto, todos os revestimentos podem sofrer deterioração com o tempo, devido à absorção de água, pressões e/ou compactação do solo, danos causados por raízes, ataques bacteriológicos, entre outras causas (Nunes, 2006).

Proteção Catódica: Atua como uma segunda barreira contra a corrosão externa, pois tem por objetivo proteger a tubulação. O princípio básico de funcionamento da proteção catódica, consiste na aplicação de uma corrente elétrica CC (corrente contínua), na superfície metálica da estrutura a proteger, em uma intensidade suficiente para reduzir o seu potencial eletroquímico a valores suficientemente baixos que resultem na diminuição da taxa de corrosão da estrutura para valores depressíveis, menores que 0,01 mm/ano (Freire, 2009). A proteção catódica é o único processo capaz de praticamente eliminar a corrosão eletroquímica e eletrolítica, mesmo em estruturas não-revestidas.

O processo de controle da corrosão por meio de proteção catódica aplica-se a toda e qualquer estrutura metálica, enterrada ou submersa, mas não a componentes aéreos ou completamente isolados do meio eletrolítico. Uma tubulação aérea deve ter a superfície interna protegida por mecanismo anticorrosivo passivo, que cria uma barreira isolante eletricamente (Silva e Oliveira, 2013), conforme vista na Figura 15.

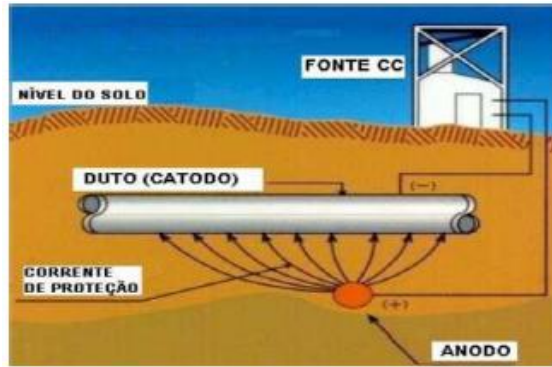


Figura 15: Proteção Catódica pelo método de corrente Impressa.
(Silva e Oliveira, 2013).

Inibidores de Corrosão - São substâncias ou misturas de substâncias, como por exemplo: hidróxidos, carbonatos, sulfatos de zinco e magnésio que, quando presente em concentrações adequadas no meio corrosivo, reduz ou elimina a corrosão (Mainier, 2001). Todos os dutos que tenham potencial de corrosividade maior que 0,125 mm/ano ou potencial de corrosividade localizada maior que 0,201 mm/ano devem ter injeção de inibidores de corrosão. O aumento da resistência à corrosão pelo uso dos inibidores constitui-se uma técnica muito utilizada, especialmente quando o meio corrosivo é líquido e trabalha/opera em circuito fechado. Quando os inibidores são adicionados ao meio corrosivo, diminuem a sua agressividade do fluido ao duto (Mainier, 2001).

2.3 CARACTERÍSTICAS FÍSICAS DOS GASES

O conhecimento das propriedades dos gases é importante para a determinação da massa específica do gás natural utilizado neste estudo.

Para gases reais o desenvolvimento das correlações das propriedades é feito a partir das relações termodinâmicas básicas entre as propriedades para substâncias homogêneas. Utiliza-se uma equação generalizada de estado para cada componente do gás natural, como por exemplo: metano, etano e o princípio dos estados correspondentes. No caso do caso do gás natural, é considerando como uma substância pseudo-pura, composta por uma porcentagem de metano, etano e outros componentes. (Penavilla, 2011).

A massa molar de uma mistura pode ser calculada pela equação 3, a massa molar de algumas das substâncias do gás natural pode ser consultada na Tabela 1.

$$M_{mistura} = \sum_{i=1}^n M_i \cdot Y_i = M_1 \cdot Y_1 + M_2 \cdot Y_2 + \dots + M_n \cdot Y_n \quad (3)$$

Onde, Y_i = fração molar do componente i , e a densidade relativa por:

$$d_{gas} = \frac{M_{mistura}}{M_{ar}} = \frac{M_{mistura}}{28,97} \quad (4)$$

As condições padrão americanas de pressão e temperatura para gases são de (1 atm, 60 °F), e as brasileiras são de (1 atm, 20 °C). Para condições fora dos padrões, se faz necessário as seguintes propriedades, calculada em função de pressão e temperatura.

Tabela 1: Propriedade constituinte do Gás Natural
(Penavilla, 2011)

Nº	Contituente	Peso Molecular	Pc Mpa	Tc K
C1	Metano	16,043	4,6	191
C2	Etano	30,07	4,88	305
C3	Propano	44,097	4,25	370
i-C4	i-Butano	58,124	3,65	408
n-C4	n-Butano	58,124	3,8	425
i-C5	i-Pentano	72,151	3,39	460
n-C5	n-Pentano	72,151	3,37	470
n-C6	n-Hexano	86,178	3,01	507
n-C7	n-Heptano	100,205	2,74	540
n-C8	n-Octano	114,232	2,49	569
n-C9	n-Nonano	128,286	2,29	595
n-C10	n-Decano	142,286	2,1	618
He	Hélio	2,016	1,3	33
Ar	Ar	28,96	3,77	132
N2	Nitrogênio	28,016	3,4	126
O2	Oxigênio	32	5,04	155
CO2	Dioxido de C	44,01	7,38	304
H2S	Gás Sulfídrico	34,076	8,96	373
H2O	Água	18,015	22,06	647

2.3.1 Propriedades Críticas

O ponto crítico de um gás é definido como a condição de estado onde se extinguem as diferenças físicas entre fases existentes de líquido saturado e vapor saturado. Neste estado a pressão, temperatura, massa específica e fator de compressibilidade são chamados de críticas, sendo a massa específica crítica, calculada conforme equação 5.

$$\rho_c = \frac{P_c.M}{Z_c.R.T_c} \quad (5)$$

Onde:

Z_c - fator de compressibilidade crítica do gás ou mistura de gases;

ρ_c - massa específica crítica (g/L) ;

P_c - pressão crítica (atm);

T_c - temperatura crítica (K);

M - massa molar (g/mol);

R - constante dos gases perfeitos (atm.L.mol⁻¹.K⁻¹).

Este cálculo é realizado para substâncias puras. Quando se abordam misturas de gases, como o gás natural, a propriedade crítica e seus valores são calculados por meio da média ponderada das propriedades críticas de seus componentes, denominada pseudocríticas.

2.3.2 Propriedades Reduzidas e Estados Correspondentes

A propriedade reduzida do gás, é definido pela relação entre a propriedade do gás em um estado e a propriedade no ponto crítico do gás, obtendo as equações 6 e 7:

$$P_r = \frac{P}{P_c} \quad (6)$$

$$T_r = \frac{T}{T_c} \quad (7)$$

Onde:

P_r - pressão reduzida (atm);

P - pressão do gás no estado atual (atm);

P_c - pressão crítica do gás (atm);

T_r - temperatura reduzida (K);

T - temperatura do gás no estado atual (K);

T_c - temperatura crítica do gás (K).

2.3.3 Equação de Clapeyron para Gases Reais

O gás a temperaturas moderadas e pressões baixas, obedecem à Lei dos Gases Perfeitos. Para os gases reais, como o gás natural, foi introduzido o fator de compressibilidade Z na equação de Clapeyron, que representa o afastamento do comportamento dos gases reais em relação ao modelo de gás perfeito, tornando-se as equações (8) e (9), da pressão e massa específica para gases reais respectivamente.

$$P = n \frac{R.T}{Z.V} \quad (8)$$

$$\rho = \frac{P.M}{Z.R.T} \quad (9)$$

Onde:

Z - fator de compressibilidade do gás ou mistura de gases;

R - constante universal dos gases perfeitos ($\text{atm.L.mol}^{-1}.\text{K}^{-1}$);

M - massa molar (g/mol) ;

ρ - massa específica ou densidade absoluta do gás ou mistura de gases (g/L) ;

T - temperatura do gás no estado atual (K);

P - pressão do gás no estado atual (atm).

A correlação gráfica de *Standing-Katz*, apresentada na Figura 16 é utilizada na indústria de petróleo para a determinação do fator de compressibilidade de um gás natural, quando os dados pressão e temperatura pseudoreduzidas são disponíveis. A correlação destas variáveis com o fator Z , foi baseada em dados experimentais de misturas binárias/bifásicas de metano com etano, propano e butano, assim como em amostras de gases reais, sendo possível a utilização em diferentes composições de misturas de hidrocarbonetos.

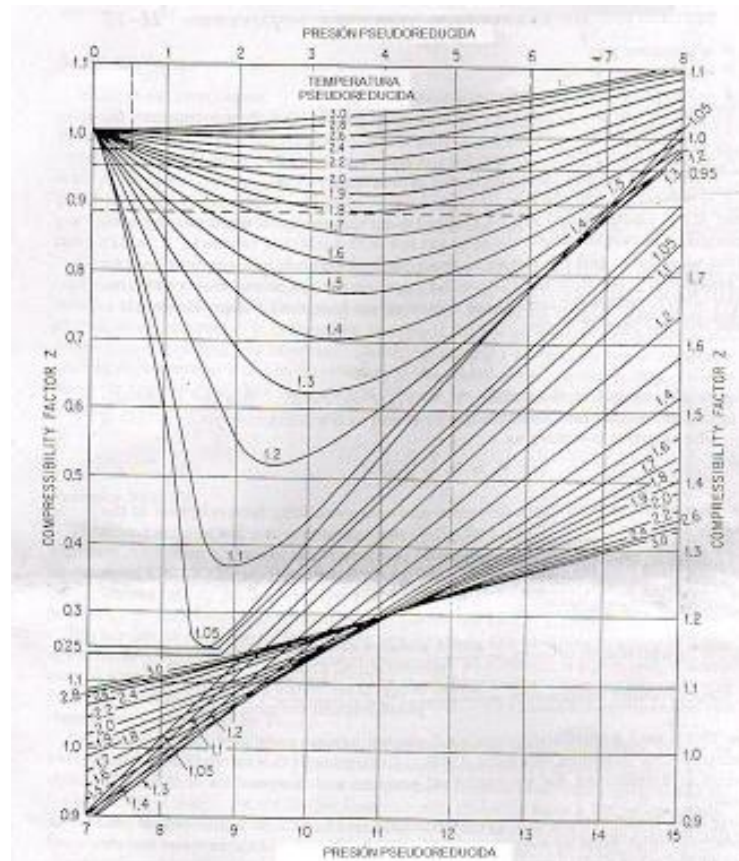


Figura 16: Fator de compressibilidade do gás natural - Gráfico de Standing-Katz (Kaltz, 1959).

Através dos dados da composição do gás natural, temperatura e a pressão de operação é possível determinar a densidade do gás que será utilizado nas simulações, utilizando as propriedades físicas do gás.

2.4 INTERAÇÃO DA RADIAÇÃO COM A MATÉRIA

Do ponto de vista físico, as radiações ao interagir com um material, podem nele provocar excitação atômica ou molecular, ionização ou ativação do núcleo (Tauhata, 2003).

A **excitação atômica ou molecular**, é a interação onde elétrons são deslocados de seus orbitais de equilíbrio e, ao retornarem, emitem a energia excedente sob a forma de luz ou raios X característicos (Ver Figura 17). A **ionização** é a interação onde elétrons são removidos dos orbitais pelas radiações, resultando elétrons livres de alta energia, íons positivos ou radicais livres quando ocorrem quebra de ligações químicas. Já a **ativação do núcleo** é a interação de radiações com energia superior à energia de ligação dos nucleons com uma

matéria, que provoca reações nucleares, resultando num núcleo residual e emissão de radiação.

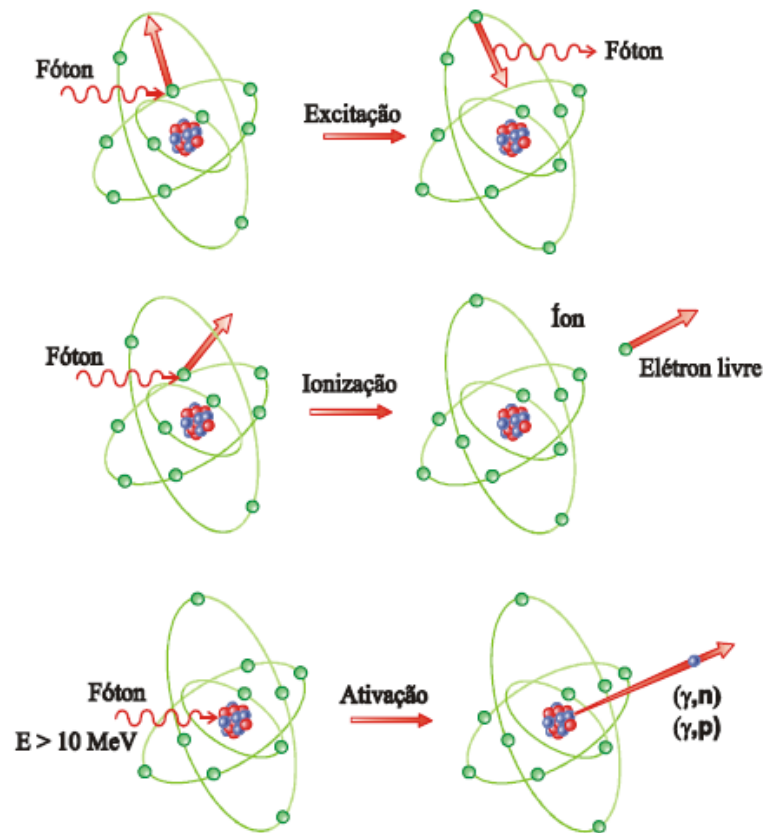


Figura 17: Modos de interação da radiação com a matéria.

(Tauhata, 2003).

No processo de transferência de energia de uma radiação incidente para a matéria, as radiações que têm carga, como elétrons, partículas alfa e fragmentos de fissão, atuam principalmente por meio de seu campo elétrico e transferem sua energia para muitos átomos ao mesmo tempo, e são denominadas radiações diretamente ionizantes. As radiações que não possuem carga, como as radiações eletromagnéticas e os nêutrons, são chamadas de radiações indiretamente ionizantes, pois interagem individualmente transferindo sua energia para elétrons, que irão provocar novas ionizações. Este tipo de radiação pode percorrer espessuras consideráveis dentro de um material, sem interagir (Tauhata, 2003).

2.4.1 Interação da radiação eletromagnética com a matéria

As radiações eletromagnéticas ionizantes de interesse, neste trabalho, são as radiações X e gama. Devido ao seu caráter ondulatório, ausência de carga e massa de repouso, essas

radiações podem penetrar em um material, percorrendo grandes espessuras antes de sofrer a primeira interação. Este poder de penetração depende da probabilidade ou secção de choque de interação para cada tipo de evento que pode absorver ou espalhar a radiação incidente (Tauhata, 2003).

Os principais modos de interação com a matéria são o efeito fotoelétrico, o efeito Compton e a produção de pares.

a) Efeito Fotoelétrico

O efeito fotoelétrico ou absorção é caracterizado pela transferência total da energia da radiação X ou gama a um único elétron orbital, que é expelido com uma energia cinética E_c definida, conforme definido Equação 10.

$$E_c = h \cdot \nu - B_e \quad (10)$$

Onde:

h - constante de Planck (keV);

ν - frequência da radiação (s^{-1});

B_e - energia de ligação do elétron orbital (keV).

A probabilidade de ocorrer o efeito fotoelétrico é maior quando a energia do fóton tem valor próximo da energia de ligação dos elétrons orbitais. Quanto maior for a diferença entre a energia do fóton e a energia de ligação do elétron, menor a chance de ocorrer a interação fotoelétrico.

Como E_c difere da energia do fóton de um valor constante B_e , com a sua transferência para o material de um detector, pode ser utilizada como mecanismo de identificação do fóton e de sua energia (Tauhata, 2003), conforme Figura 18.

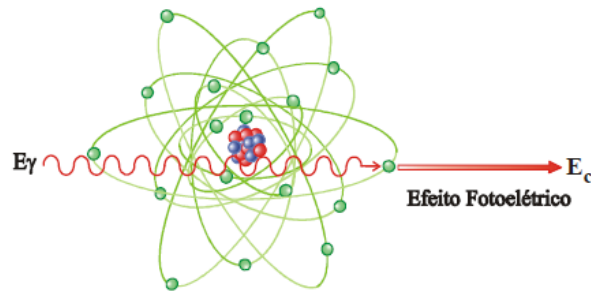


Figura 18: Efeito Fotoelétrico.

(Tauhata, 2003)

b) Efeito Compton

No espalhamento Compton, a energia do fóton espalhado é menor do que a do fóton incidente; ou seja, o fóton incidente transfere uma fração de sua energia a um elétron das camadas fracamente ligadas de um átomo, resultando em um fóton de energia reduzida E_γ' , conforme observado na Figura 18.

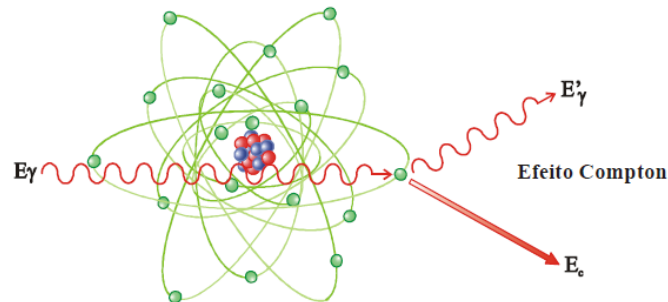


Figura 19: Efeito Compton.

(Tauhata, 2003)

A partir das equações de conservação do momento e de energia, calcula-se a energia do fóton espalhado (E_γ') que possui direção diferente do fóton incidente e é calculada pela Equação 11.

$$E_\gamma' = \frac{h\nu}{1 + \frac{h\nu}{m_0c^2}(1 - \cos\theta)} \quad (11)$$

Onde:

$h\nu$ - energia do fóton incidente (keV);

θ - ângulo de espalhamento relativo à direção inicial;

m_0 - massa de repouso do elétron (kg);

c - velocidade da luz ($m.s^{-1}$);

m_0c^2 - energia de repouso do elétron (511 keV).

Quando a energia do fóton incidente é muito maior do que a energia de ligação dos elétrons orbitais, o espalhamento Compton prevalece sobre as outras duas interações (fotoelétrico e *Rayleigh*). No caso de fótons com energias (100 keV – 10 MeV) materiais com baixo número atômico ($Z \leq 40$), espalhamento Compton é o maior mecanismo de interação (Tauhata, 2003). A probabilidade de ocorrer espalhamento Compton é diretamente proporcional à energia do fóton e inversamente ao número atômico. O número de fótons espalhados que alcançam o detector pode ser obtido pela Equação 12.

$$S = \Phi_o(E)\varepsilon(E)t \exp\left(-\int_{l_1} \mu(E_\gamma)dl\right) \frac{d_e\sigma^{KN}}{d\Omega} \frac{\rho N_A Z}{A} \exp\left(-\int_{l_2} \mu(E_\gamma)dl\right) dVd\Omega \quad (12)$$

Onde:

t - tempo de contagem (s);

$I_0(E)$ - fluxo de fóton incidente com energia (E);

$d_e\sigma^{KN}/d\Omega$ - seção de choque diferencial Klein-Nishina na energia (E) para um elétron livre, que é a probabilidade espalhamento de um fóton;

$d\Omega$ - ângulo sólido subtendido pelo detector conforme visto do ponto de interação;

ρ -densidade;

Z - número atômico;

N_A - número de Avogadro;

A - número de massa do material sobre análise;

μ_1 e μ_2 - são os coeficientes de atenuação linear para fótons primários e espalhados dentro da amostra;

ε - eficiência de contagem de fotopico do detector na energia do fóton espalhado;

l_1 e l_2 - comprimentos dos caminhos dos fótons na amostra da fonte até o centro de espalhamento e de volta para o detector;

dV - volume diferencial considerado para a radiação e sua interação com a matéria.

No caso de uma amostra homogênea e uma geometria com fonte puntiforme, os termos das integrais são constantes. Além disso, a seção de choque diferencial Klein-Nishina será constante para uma geometria fixa, uma dada energia do fóton incidente e fluxo. Portanto, a taxa de contagem depende apenas da densidade do material examinado e informações obtidas por esta técnica são fortemente dependentes desta grandeza, de forma que a variação de densidade dentro da amostra pode ser monitorada.

c) Espalhamento Coerente ou Efeito Rayleigh

O efeito Rayleigh é interações de fótons de baixa energia com elétrons muito ligados, pode ocorrer uma interação onde o átomo todo absorve o recuo e o fóton praticamente não perde energia, mudando simplesmente sua direção. (Tauhata, 2003).

d) Formação de Pares

Predominância de absorção da radiação eletromagnética de alta energia e a produção de par elétron-pósitron. Este efeito ocorre quando fótons de energia superior a 1,022 MeV passam perto de núcleos de número atômico elevado, interagindo com o forte campo elétrico nuclear (Tauhata, 2003). Conforme Figura 19, a radiação desaparece e dá origem a um par elétron-pósitron ($2mc^2 = 1,022 \text{ MeV}$).

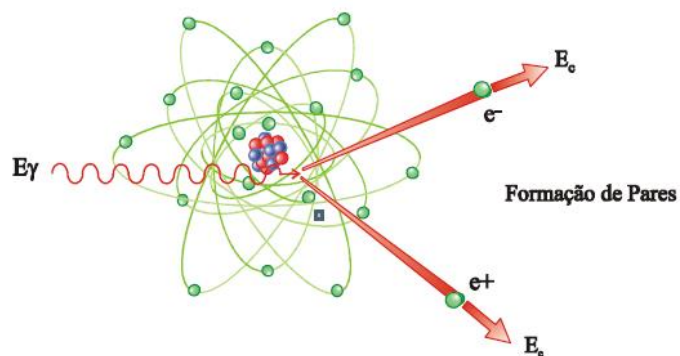


Figura 20: Efeito Produção de Pares.

(Tauhata, 2003)

e) Processo de interação em função da energia do fóton.

A predominância de cada interação é em função da energia do fóton, ou seja, as interações fotoelétricas predominam para todos os materiais em energias de fótons suficientemente

baixas, mas à medida que a energia cresce, o efeito fotoelétrico diminui mais rapidamente que o efeito Compton e este acaba se tornando o efeito predominante. Continuando a aumentar a energia do fóton, ainda que o efeito Compton decresça em termos absolutos, continua aumentando em relação ao efeito fotoelétrico. Acima da energia de 1,022 MeV para o fóton, a produção de pares passa a ser a principal contribuição para as interações de fótons. A Figura 20, mostra a variação da participação de cada um desses processos para a variação de Z e da energia dos fótons.

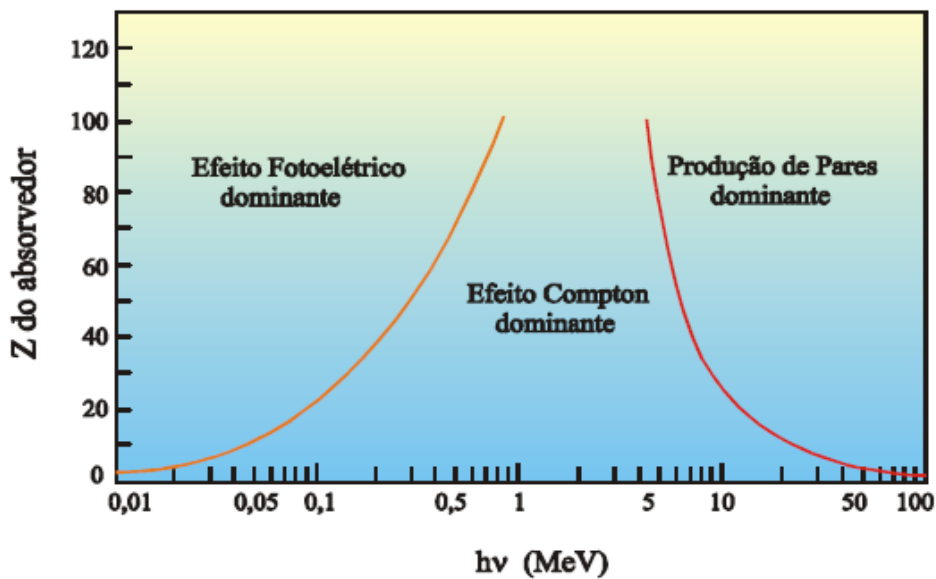


Figura 21: Tipo de Interação em função da energia do fóton e do número atômico.

(Tauhata, 2003)

2.4.2 Atenuação de feixe transmitidos.

Um feixe de raio gama ou X, tem sua intensidade diminuída em função das interações que ocorrem com o material que as absorve. A atenuação da energia das radiações ocorre de maneira exponencial em função da espessura do material absorvedor. Isso significa que quanto mais espesso o material, menor será a energia da radiação que deixa o material depois de atravessá-lo (se atravessá-lo). A atenuação dos fótons (ou da radiação) é representada pela Equação 13.

$$I = I_0 \cdot e^{-\mu x} \quad (13)$$

Onde:

I – intensidade transmitida de raios gama (fótons.cm⁻².s⁻¹);

I_0 – intensidade incidente de raios gama (fótons.cm⁻².s⁻¹);

x – espessura do meio alvo (cm);

μ – coeficiente de atenuação linear (cm⁻¹).

a) Atenuação de feixe transmitidos no gasoduto.

No feixe transmitido, uma fonte de radiação gama monoenergética e colimadíssima, com energia suficiente para penetrar e ser transmitida por todo o duto é posicionada em um dos lados do duto e um detector cintilador NaI(Tl) é instalado, diametralmente oposto à fonte com a finalidade de registrar a taxa de contagem. O registro do sinal no detector é proporcional a transmissão dos raios gama devido à espessura do duto, a trinca/ perda de espessura e o fluxo existente no interior do tubo. O duto pode ser representado por um sistema absorvedor composto de “n” camadas de fluidos com diferentes espessuras e coeficientes de atenuação. Considerando um modelo simplificado com a fase gasosa se deslocando em um duto com secção reta cilíndrica, conhecendo-se as dimensões e as características do tubo e do fluido transportado tem-se que a intensidade do feixe transmitido pode ser calculada pela lei de Beer–Lambert’s referência, com a Equação 14.

$$I(E) = I_0(E). e^{-(\mu_{duto}X_D + \mu_{gás}X_G + \mu_{trinca\ ou\ corrosão}X_F)} \quad (14)$$

Onde:

I – intensidade transmitida de raios gama (fótons. cm⁻².s⁻¹);

I_0 – intensidade incidente inicial de raios gama da fonte (fótons.cm⁻².s⁻¹);

X – espessura do fluido, D - duto, G - gás e F –Trinca ou corrosão (cm);

E – energia da radiação incidente;

μ – coeficiente de atenuação linear total D - duto, G - gás e F –trinca ou corrosão, (cm⁻¹).

b) Coeficiente de Atenuação em massa.

O coeficiente de atuação em massa não depende do estado físico do material, sendo definido como a razão entre o coeficiente linear μ e a densidade absoluta do material absorvedor ρ .

$$\mu_m = \frac{\mu}{\rho} \quad (15)$$

Onde:

μ_m – coeficiente de atenuação em massa ($\text{cm}^2 \cdot \text{g}^{-1}$);

μ – coeficiente de atenuação linear (cm^{-1});

ρ – massa específica ou densidade absoluta.

Dispositivos baseados nesta técnica nuclear permitem a “observação” detalhada das características do fluxo, especialmente a densidade, a distribuição das partículas sólidas, a concentração no meio e a velocidade de deslocamento entre outros referencias. O método é baseado na atenuação de um feixe transmitido/espalhado monoenergético de raios gama por uma tubulação contendo fluido sendo o sinal registrado por detector(es), os quais serão utilizados neste trabalho.

2.5 CODIGO MCNPX

O código MCNP (Monte Carlo N-Particle) é um código que utiliza o método Monte Carlo para estimar o transporte de nêutrons, fótons e elétrons. A versão recente MCNPX (Monte Carlo N-Particle eXtended) possui diferentes tipos e faixa de energia de partículas, possibilitando o estudo do transporte da radiação e a interação com a matéria, envolvendo nêutrons, fótons, elétrons e partículas carregadas como prótons, dêuterons, partículas alfa, etc (Lanl, 2003).

O código é capaz de tratamento de geometrias complexas em 3 dimensões e a variedade de seções de choque e de opções para dados de entrada, torna este código, uma ferramenta de grande relevância no campo de pesquisa em física médica, proteção radiológica, modelagem de instalações nucleares, detectores e blindagens da radiação e reatores nucleares.

O usuário cria um arquivo de entrada que é lido pelo MCNPX. Este arquivo contém informações sobre o problema em áreas como: a especificação da geometria, a descrição de materiais e a seleção de avaliações de seções de choque, a localização e as características da fonte de nêutrons, fótons ou elétrons (Lanl, 2003).

São consideradas no código MCNP as seguintes faixas de energia: nêutrons de 10^{-11} MeV até 20 MeV para todos os isótopos, até 150 MeV para alguns isótopos, fótons de 1 keV até 100 GeV e elétrons de 1 keV até 1 GeV (Lanl, 2003).

As simulações deste presente trabalho, foram realizadas utilizando o código MCNPX, tal ferramenta auxilia nas criações das geometrias, antes da realização de possíveis modelos experimentais, possibilitando maior assertividade nos resultados.

Para as realizações das simulações foram utilizados número de histórias (NPS) de $9E7$, para os estudos das fontes e feixes transmitidos e de $1E9$ para simulações de feixes espalhados. Os dados utilizados neste estudo estão com erro inferiores a 1% no MCNPX.

Foi utilizado o comando de registros F8 de distribuição de altura de pulsos em um detector, fonte puntiforme colimada com ângulo de 18° e dados de saída com 10 keV por canal.

CAPÍTULO III

3 METODOLOGIA

Este trabalho baseia-se no estudo da técnica de densitometria gama com medições da transmissão e espalhamento, utilizando o código MCNPX, para identificação das trincas e das perdas do material do aço carbono provocadas por corrosões internas nos gasodutos. Para isso, algumas definições e estudos foram realizados para predizer a menor dimensão de uma corrosão e trinca que pode ser identificado em um gasoduto, os quais foram:

1. Definição da dimensão do duto a ser analisado;
2. Definição da composição química do gás natural e pressão interna no duto, afim de determinar sua densidade absoluta;
3. Determinação da energia da fonte a ser utilizada nas simulações;
4. Dimensões da corrosão e trincas a serem analisadas;
5. Definição das geometrias a serem utilizadas.

3.1 DEFINIÇÃO DO DUTO E DA COMPOSIÇÃO DO GÁS NATURAL

Nas geometrias desenvolvidas, utilizou-se de duto de aço carbono, com dimensões de 4” de diâmetro e 54 mm de espessura. No interior do duto foi utilizado o fluido gás natural, a uma pressão de 50 kgf/cm², temperatura padrão de 20°C e a referência da composição do gás natural comercializado, ou seja, entregue a Companhia Distribuidora, conforme Tabela 2. Com os dados da composição do gás natural e a pressão interna do gasoduto, foi possível encontrar o fator de compressibilidade do gás e determinar a densidade absoluta do gás natural, para realização das simulações.

Os aços para os dutos na indústria do petróleo e gás natural são normalmente classificados, segundo a API (Instituto Americano de Petróleo), em função da sua utilização, resistência mecânica e composição química (Fernandes, 2011). O aço utilizado neste estudo foi o API 5L GR B, com a composição química definido na Tabela 3.

Tabela 2: Composição química de uma amostra de gás natural
(Oliveira, 2009).

Componentes	Porcentagem Volumétrica
Metano (CH ₄)	88,670%
Etano (C ₂ H ₆)	7,010%
Propano (C ₃ H ₈)	2,000%
I-butano (C ₄ H ₁₀)	0,248 %
N-Butano (C ₄ H ₁₀)	0,070 %
I-Pentano (C ₅ H ₁₂)	0,090 %
N-Pentano (C ₅ H ₁₂)	0,080 %
Dióxido de Carbono (CO ₂)	0,694 %
Nitrogênio (N ₂)	0,915 %

Tabela 3: Composição química de um aço API 5L Gr B
(Silva *et al.*, 2014)

Componentes	Porcentagem em Peso
Ferro – Fe	98,47 %
Manganês – Mn	0,91 %
Silício – Si	0,23 %
Carbono – C	0,19 %
Crômio – Cr	0,05 %
Molibdênio – Mo	0,03 %
Níquel – Ni	0,02 %
Enxofre – S	0,01 %
Fosforo – P	0,009 %

3.2 DETERMINAÇÃO DA ENERGIA DA FONTE DE RADIAÇÃO.

Este estudo visa identificar a energia mais adequada que possibilite a identificação das corrosões e trincas. A definição da energia da fonte, é resultado da análise dos coeficientes de atenuação em massa do material aço carbono API 5L Gr B em diferentes energias de radiação gama (0,03 MeV a 0,7 MeV), foi obtida por meio software NIST XCOM. Para validações dos dados, foram realizadas simulações com auxílio do código MCNPX.

O sistema constitui na análise da atenuação do feixe transmitido e espalhado, realizando dois estudos, o primeiro foi utilizado um bloco maciço de material aço carbono API 5L Gr B de dimensões 6 x 6 x 1,08 cm, correspondendo a largura, altura e soma das espessuras duto sem falha (2 x 0,54mm). Depois foi realizado o estudo, simulando um bloco de dimensões 6 x 6 x 0,98 cm, correspondente a perda de 1 mm da soma da espessura do duto.

O estudo foi realizado com as energias de 59,54 keV (Amerício-241), 80,998 keV (Bário-133), 316,51 keV (Iridio-192), e 662 keV (Césio-137). Foram utilizadas fontes puntiformes de feixe colimadíssimo (*pencil-beam*) e três detectores cintiladores de NaI(Tl) 2"x2", colimados com chumbo de 50,8 mm de diâmetro interno e com abertura frontal, posicionados a 180° e 135° em relação à fonte, conforme representado na Figura 22.

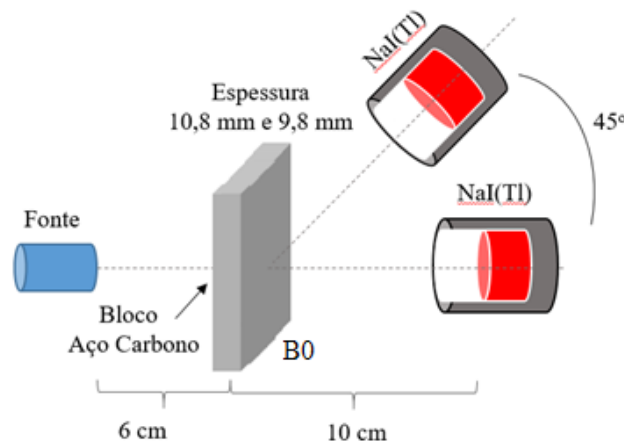


Figura 22: Análise dos feixes transmitidos e espalhados em diferentes energias de radiação gama.

3.3 AVALIAÇÃO DA INFLUÊNCIA DO DUTO E DO GÁS NATURAL NAS SIMULAÇÕES.

Para análise da influência do duto nos feixes transmitidos e espalhados, foi realizado o estudo substituindo o bloco maciço de aço carbono de dimensões 6 x 6 x 1,08 cm da Figura 22, por um duto de aço carbono API 5L Gr B de dimensões de 4" de diâmetro, espessura de 54 mm, sem o gás natural no interior do duto, conforme demonstrado na Figura 23. Foram utilizados para este estudo as fontes de Césio-137 e Bário-133 com feixe colimadíssimo (*pencil-beam*) e três detectores cintiladores de NaI(Tl) 2"x2" colimados com chumbo de 50,8 mm de diâmetro interno e com abertura frontal, localizados a 180°, 135° e 90° da fonte.

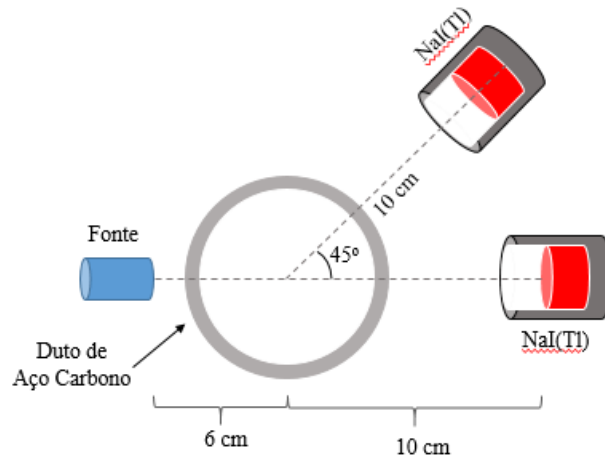


Figura 23: Avaliação da influência do duto de aço carbono nos feixes transmitidos e espalhados.

Foram realizados estudos dos feixes espalhados e transmitidos com o duto sem e com o gás natural no interior a 50 kgf/cm^2 , afim de avalizar a influência do gás natural nas simulações.

3.4 DETERMINAÇÃO DA FALHA NOS DUTOS.

3.4.1 Determinação da corrosão.

Para o estudo das corrosões nos gasodutos, foi simulado em todas as geometrias, a perda do material aço carbono no formato retangular (paralelogramo), mantendo fixo a espessura do duto em 2 mm e profundidade de 50 mm, modificando a largura da corrosão a passos de 2 mm, iniciando de um duto sem corrosão até 20 mm conforme Figura 24. Por meio desta geometria é possível simular um processo de corrosão interna uniforme do duto.

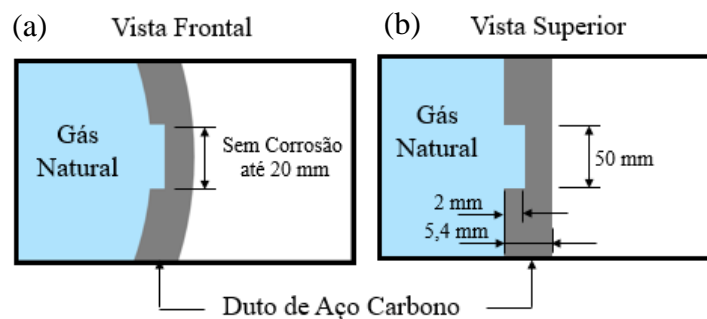


Figura 24: Medidas das corrosões simuladas, modificando a largura.

(a) Vista frontal (b) Vista superior

A fim de identificar a menor corrosão possível a ser detectado no modelo criado, foi simulado também a corrosão de 1 mm de largura.

Alteração da espessura do duto também foi simulada, mantendo as dimensões de 50 mm de profundidade e 30 mm de largura. O estudo iniciou-se com um duto sem corrosão até 5 mm da perda de espessura do aço carbono, a passos de 0,5 mm, conforme Figura 25.

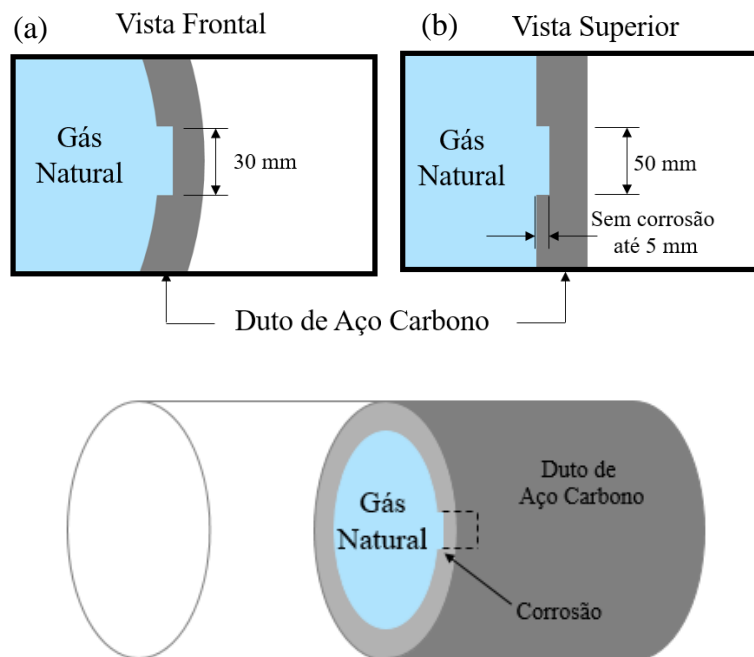


Figura 25: Medidas das corrosões simuladas, modificando a espessura.

(a) Vista frontal (b) Vista superior

3.4.2 Determinação da Trinca

Para o estudo das trincas nos gasodutos, foi simulado em todas as geometrias, trincas de abertura fixa de 0,5 mm e altura de 2 mm (conforme detalhe na Figura 26 a), modificando a extensão da trinca a passos de 5 mm. O estudo iniciou de um duto sem trinca até uma trinca de largura de 40 mm, conforme Figura 26. Com esta geometria é possível simular um processo propagação de uma trinca.

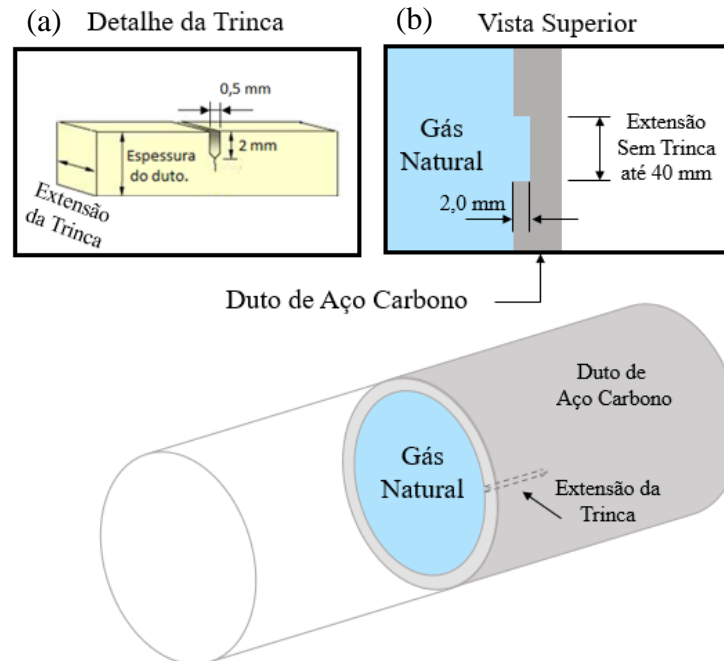


Figura 26: Medidas das trincas simuladas

(a) Detalhe da trinca (b) Vista superior

3.4.3 Estudo dos feixes transmitidos e espalhados para detecção de diferentes espessuras de corrosões e trincas.

a) Geometria para o estudo dos feixes transmitidos.

Na geometria para o estudo dos feixes transmitidos, foi utilizado o duto de aço carbono API 5L GR B, com dimensões de 4" de diâmetro e 54 mm de espessura, a pressão interna de 50 kgf/cm² de gás natural. Utilizado uma fonte colimada de Bário-133 e de Césio-137 simuladas separadamente, afim que os fótons incidentes cheguem diretamente para o detector posicionado à frente da fonte, com feixe estreito de forma apropriada com o ângulo de 18° de divergência. Foram simulados um detector cintilador de NaI(Tl) 2"x2", posicionados a 180° da fonte, colimado com chumbo de 50,8 mm de diâmetro interno, com abertura frontal, conforme apresentado na Figura 27.

A geometria foi elaborada visando estudar as corrosões e as trincas, através da atenuação dos feixes transmitidos da fonte em relação ao detector, realizando um sistema de varredura ao redor do gasoduto, a fim de detectar a corrosão e as trincas em toda a região interna do duto.

Para o estudo, a trinca e a corrosão foram inseridas à frente do detector, dentro da faixa estreita emitida pela fonte ao detector, ou seja, dentro do ângulo sólido do detector.

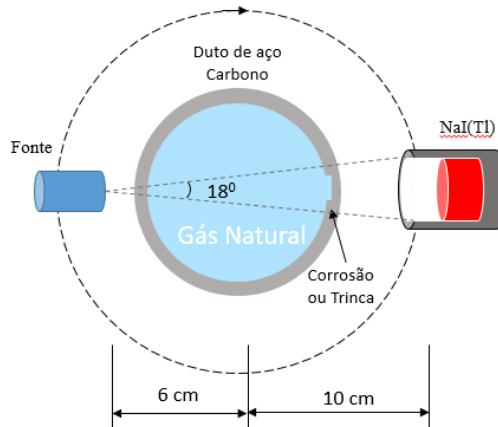


Figura 27: Geometria para estudo dos feixes transmitidos.

b) Geometria para o estudo dos feixes espalhados.

Para o estudo dos feixes espalhados, foi utilizado uma fonte colimada de Bário-133 e de Césio-137 simuladas separadamente, com feixe estreito em direção ao gasoduto de 18° . Foi simulado um detector cintilador de NaI(Tl), de cristal $2'' \times 2''$, colimado com chumbo de 50,8 mm de diâmetro interno com abertura frontal, posicionado a um ângulo de 135° da fonte. Conforme ilustrado na Figura 28.

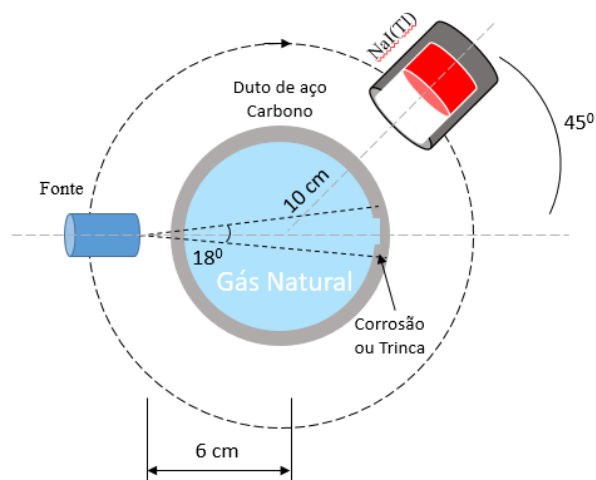


Figura 28: Geometria para estudo dos feixes espalhados.

3.4.4 Determinação da localização da corrosão na circunferência do duto.

Este estudo visa determinar a localização de uma corrosão, utilizando o espalhamento Compton. O modelo criado consiste em analisar a localização da corrosão com auxílio de dois detectores localizados a um ângulo de 90 graus em relação à uma fonte Césio-137, onde o primeiro D1 está a 90 graus e o D2 a 270 graus. Foram estudadas cinco diferentes posições das corrosões de dimensões 20 x 50 x 2mm (largura, altura e espessura), no interior do duto e a posição variou em ângulos de 0°, 30°, 45°, 90°, 180° e simulado sem corrosão, conforme Figuras 29 (a), (b), (c), (d), (e) e (f). Os dados obtidos do número de fótons espalhados detectados pelos detectores D1 e D2 em diferentes posições da corrosão, foram comparados para análise da localização da corrosão.

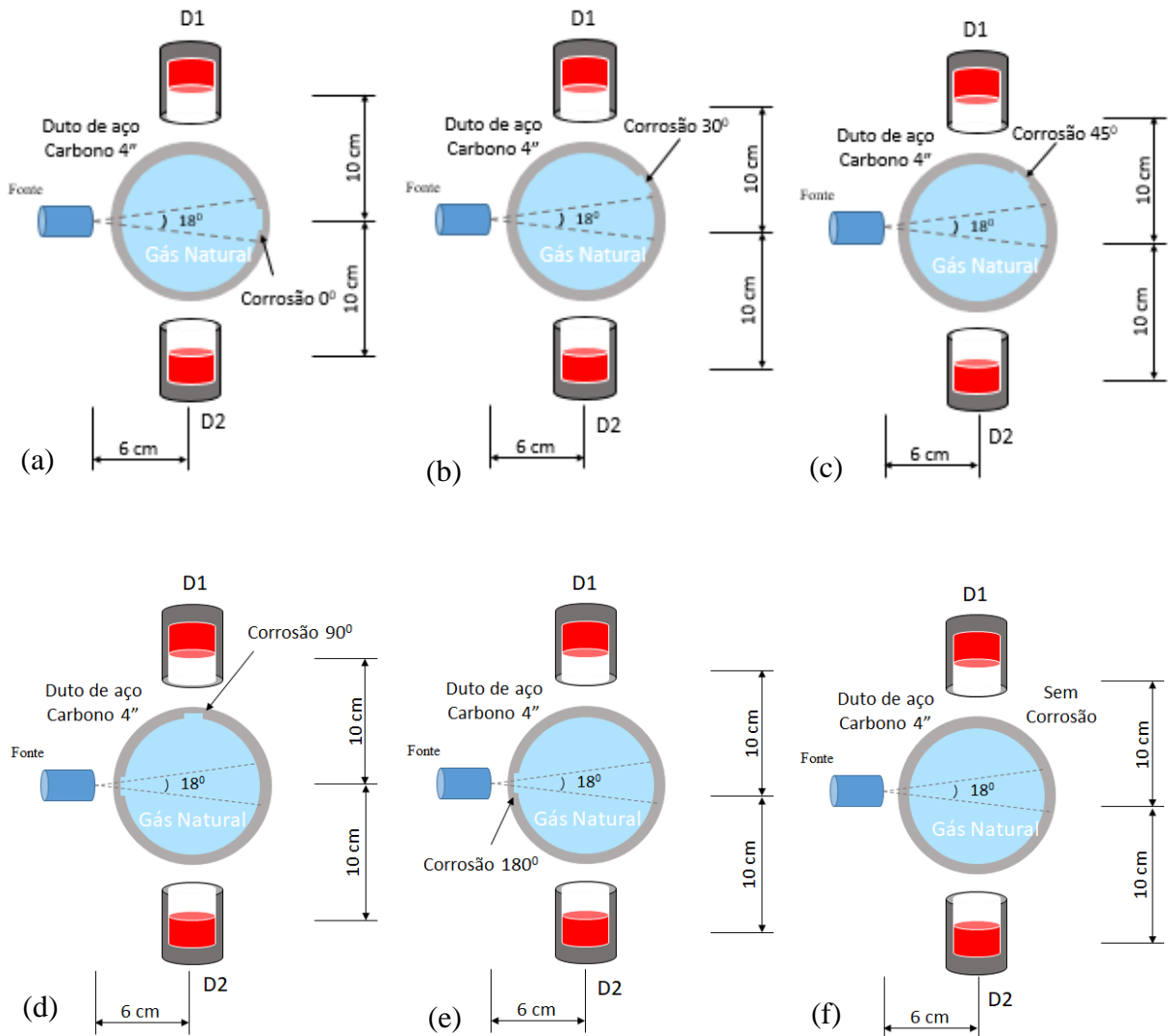


Figura 29: Determinação da localização da corrosão no gasoduto: (a) 0°, (b) 30°, (c) 45°, (d) 90°, (e) 180° e (f) sem corrosão.

CAPÍTULO IV

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Neste capítulo, serão apresentados os resultados dos estudos descritos na metodologia, representando o modelo matemático das geometrias realizadas.

4.1 DEFINIÇÃO DA ENERGIA DA FONTE DE RADIAÇÃO

Na Figura 30 é apresentada os coeficientes de atenuação em massa, para material aço carbono API 5L Gr B em função da energia da radiação gama (0,03 MeV a 0,7 MeV), calculada pelo código NIST XCOM.

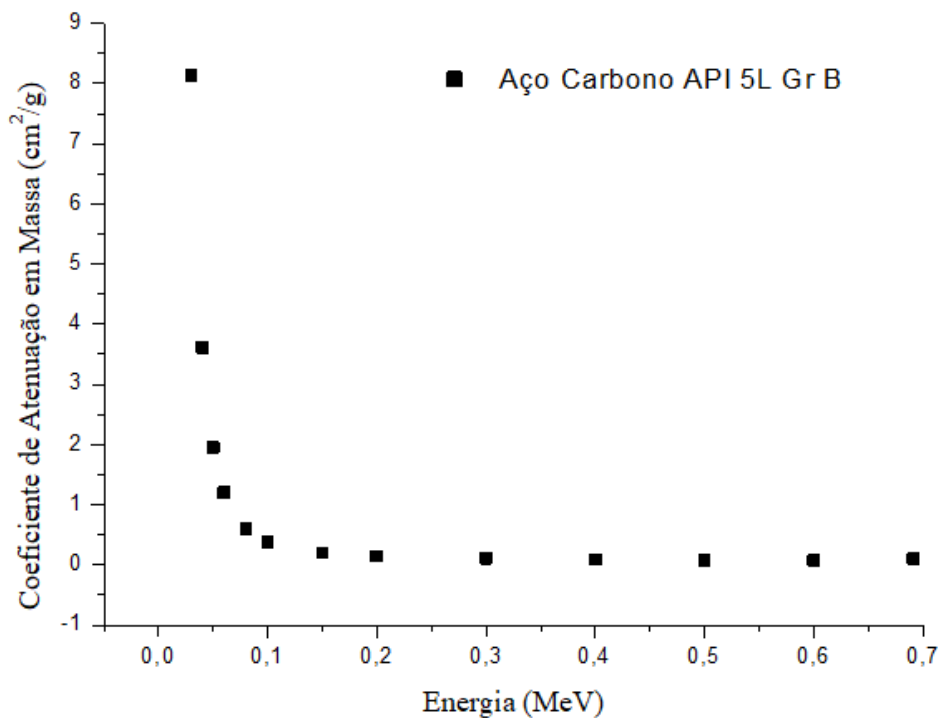


Figura 30: Coeficiente de Atenuação em Massa em função da Energia.

Como pode observar, o coeficiente de atenuação em massa é significativo nas energias de radiação gama menor que 100 keV, ocasionada pela predominância dos efeitos fotoelétrico e Compton. Desta forma, para avaliar a fonte adequada para a realização das simulações, desenvolveu-se uma geometria formada por um bloco aço carbono, conforme definido na

Figura 22, utilizando as energias de 59,54 keV (Amerício-241), 80,998 keV (Bário-133), 316,51 keV (Irídio-192), e 662 keV (Césio-137).

As Figuras 31 (a), (b), (c) e (d) representam o número de fótons transmitidos detectados pelo detector cintilador NaI(Tl) a 180° da fonte, com as espessuras de 9,8 mm e 10,8 mm do bloco de aço carbono API 5L Gr B e fontes de Amerício-241, Bário-133, Irídio-192 e Césio-137 respectivamente.

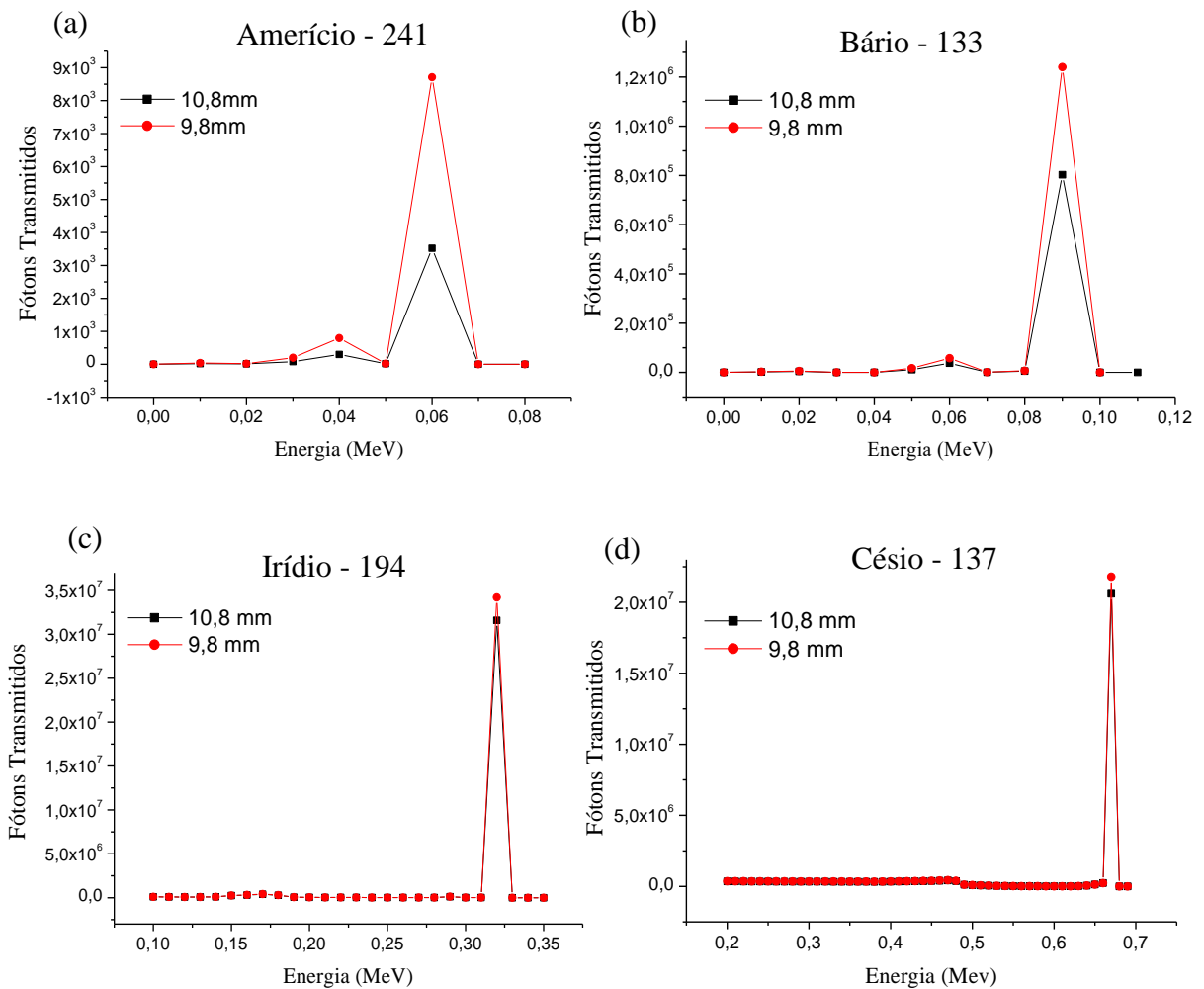


Figura 31: Fótons transmitidos detectados pelo detector de NaI(Tl) a 180° da fonte, utilizando as fontes de: (a) Amerício-241, (b) Bário-133, (c) Irídio-192 e (d) Césio-137.

Na tabela 4, estão apresentados os valores de atenuação dos fótons transmitidos, para cada fotopico das fontes de Amerício-241, Bário-133, Irídio-192 e Césio-137, obtidos pelo código MCNPX. Como pode ser observado as fontes Amerício-241 e Bário-133 apresentaram maior sensibilidade, na variação de 1 mm de espessura do bloco.

Tabela 4: Atenuação dos feixes transmitidos no Fotopico (I/I_0).

Fonte	Espessura do bloco do Aço Carbono		Erro do MCNP (%)
	10,8 mm	9,8 mm	
Amerício-241	7,38E-05	1,90E-04	1,84
Bário-133	1,18E-02	1,82E-02	0,12
Irídio-192	2,80E-01	3,03E-01	0,03
Césio-137	1,32E-01	1,40E-01	0,004

As Figuras 32 (a), (b), (c) e (d) representam o número de fótons espalhados detectados pelo detector cintilador NaI(Tl) a 135° da fonte, com as espessuras de 9,8 mm e 10,8 mm do bloco de aço carbono API 5L Gr B e fontes de Amerício-241, Bário-133, Irídio-192 e Césio-137 respectivamente.

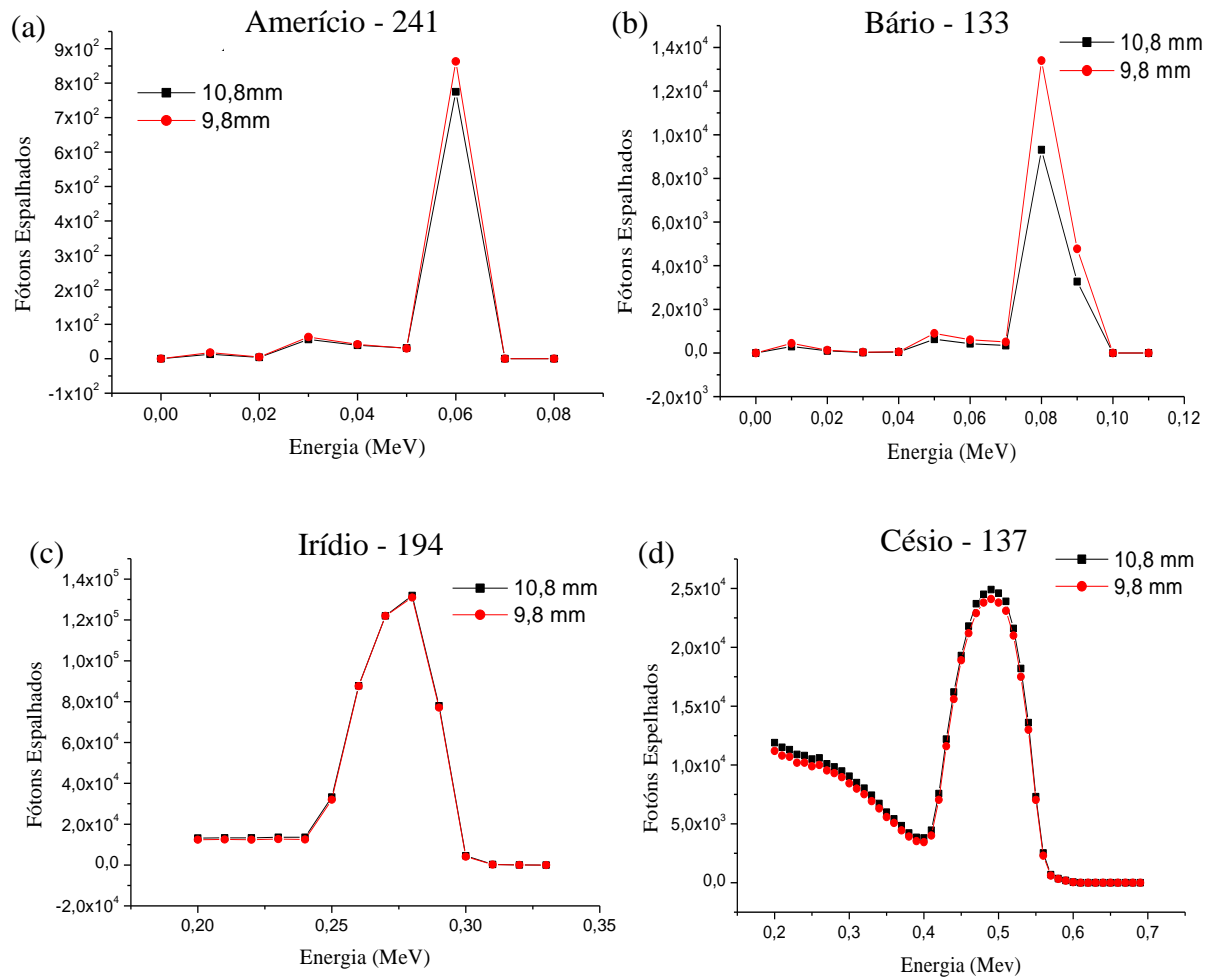


Figura 32: Fótons espalhados detectados e pelo detector de NaI(Tl) a 135° da fonte, utilizando as fontes de (a) Amerício-241, (b) Bário-133, (c) Irídio-192 e (d) Césio-137.

4.1.1 Potencialidade do código no cálculo de espalhamento.

Para avaliar a potencialidade do código MCNP-X no cálculo de espalhamento. Os resultados obtidos foram comparados com dados teóricos obtidos pela Equação 11, conforme Tabela 5.

Tabela 5: Energia do fóton espalhado teórico e simulado.

DADOS	Americio-241	Báριο-133	Irídio-192	Césio-137
(MCNPX)	60 keV	80 keV	270 keV	480 keV
Teórico (Eq. 11)	57,57 keV	77,40 keV	267,907 keV	479,90 keV
Erro Relativo (%)	4,22	3,35	0,78	0,02

Pode-se observar que os valores obtidos das energias dos fótons espalhados, apresentam valores do erro relativo máximo de 4,22% comparado ao valor teórico, correspondendo a faixa de energia de saída do código MCNP-X e validando a geometria simulada no código.

A partir dos dados dos feixes transmitidos e espalhados, duas fontes serão estudadas, a fonte Báριο-133 com energia 80,998 keV, que apresentou significativa atenuação dos feixes transmitidos com menor erro obtido no MCNPX, em comparação ao Americio-241 e obteve maior variação de número de fótons espalhados em relação as outras fontes estudadas e a fonte de Césio-137 de energia 662 keV, que apresentou variação aos fótons espalhados, quando alterada 1 mm da espessura do material aço carbono em relação ao Irídio-194. Desta forma, as energias das fontes Báριο-133 e Césio-137 foram utilizadas nos estudos das simulações para análise das corrosões e trincas no duto.

4.2 INFLUÊNCIA DO DUTO NO RESULTADO DAS SIMULAÇÕES

As Figuras 33 e 34 (a) e (B) mostram os resultados dos feixes transmitidos e espalhados, detectados pelo detector a 135° das fontes de Báριο-133 e Césio-137 respectivamente, utilizando o aço carbono 4" API 5L Gr B sem o gás natural, representados na Figura 22, os resultados obtidos foram comparados ao estudo inicialmente realizado com um bloco (B0), conforme Figura 22. Como pode ser observado, nas duas energias estudadas não houve alteração significativa nos fótons transmitidos. Contudo, no estudo do espalhamento, para a energia da fonte de Báριο-133 houve redução 37% do número dos fótons espalhados

detectados pelo detector a 135° da fonte, na energia de 80 keV e para a energia da fonte Césio-137, os espalhamentos gerados pelos blocos de aço carbono são distribuídos em dois picos, 360 keV e 550 keV.

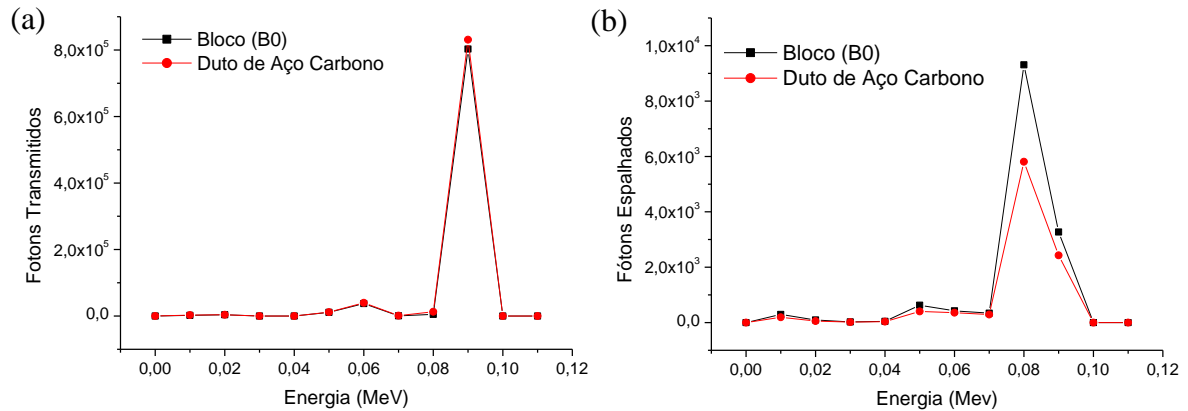


Figura 33: Influência do duto de aço carbono, com a fonte de Bário-133

(a) transmissão (b) espalhamento do detector a 135° da fonte.

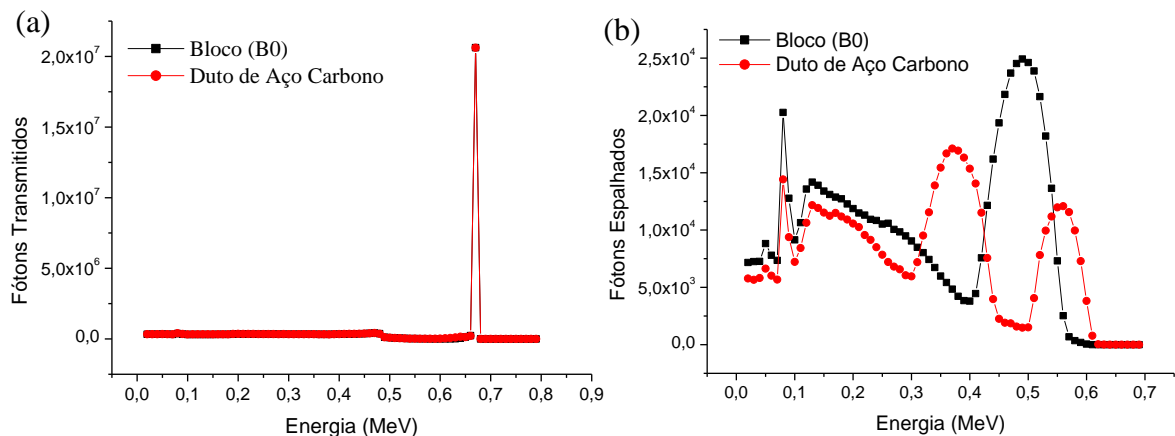


Figura 34: Influência do duto de aço carbono, com a fonte de Césio-137

(a) transmissão (b) espalhamento do detector a 135° da fonte.

Para validação e análise da influência das paredes do duto, nos dois picos de energias apresentados no espalhamento utilizando a fonte de Césio-137 da Figura 34 (b), foi realizado um estudo substituindo o duto de aço carbono de 4" de diâmetro e 54 mm de espessura da Figura 35 (a), por dois blocos de dimensões 6 x 6 x 0,54 cm, simulando as duas paredes dos dutos e equidistante de 9,08 cm (diâmetro interno do duto), conforme Figura 35 (b). Primeiro estudo foi realizado somente com o bloco de aço carbono (B1) e o segundo estudo com os dois blocos (B1 e B2). Foram utilizados para este estudo a fonte de Césio-137 com feixes colimadíssimos (*pencil-beam*) e três detectores cintiladores de NaI(Tl) 2"x2" colimados com

chumbo de 50,8 mm de diâmetro interno e com abertura frontal, localizados a 180° , 135° e 90° da fonte. Os dados encontrados foram validados com a equação (11).

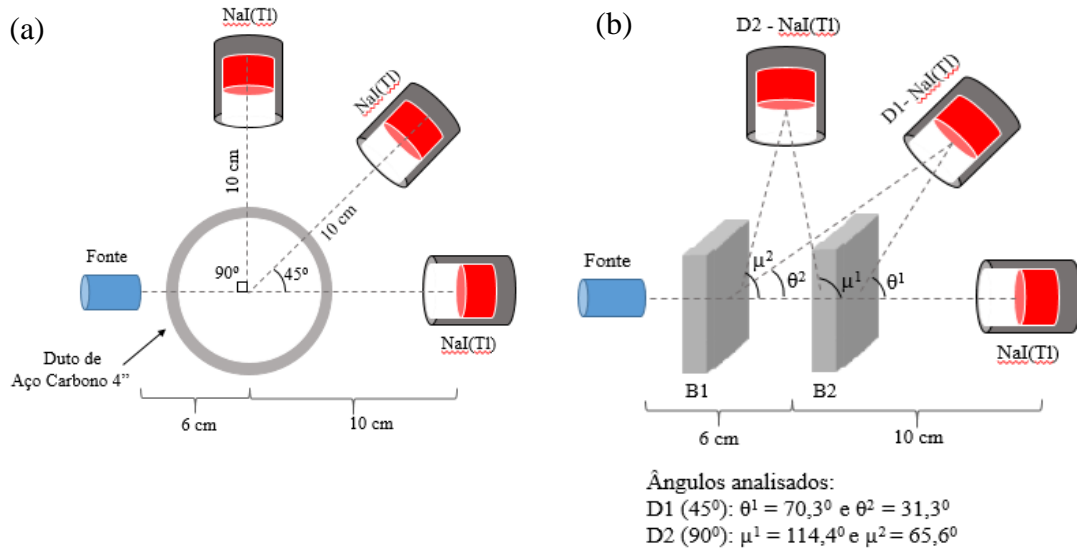


Figura 35: Análise dos feixes espalhados com a fonte de Césio-137 (a) ângulos em relação ao centro duto (b) ângulos analisados para validação do resultado.

Através deste estudo, foi possível obter dois picos nas energias 360 keV e 550 keV, equivalente as energias de pico do aço carbono. O resultado obtido foi comparado ao valor teórico na Tabela 6, utilizando os ângulos aproximado de espalhamento de $70,3^\circ$ para o bloco B2 e $31,3^\circ$ para o bloco B1. Através deste resultado, pode-se afirmar que o pico de energia a 550 keV, está relacionado ao espalhamento dos feixes ocasionado pelo bloco B1 e 360 keV, pelo bloco B2, conforme Figura 36.

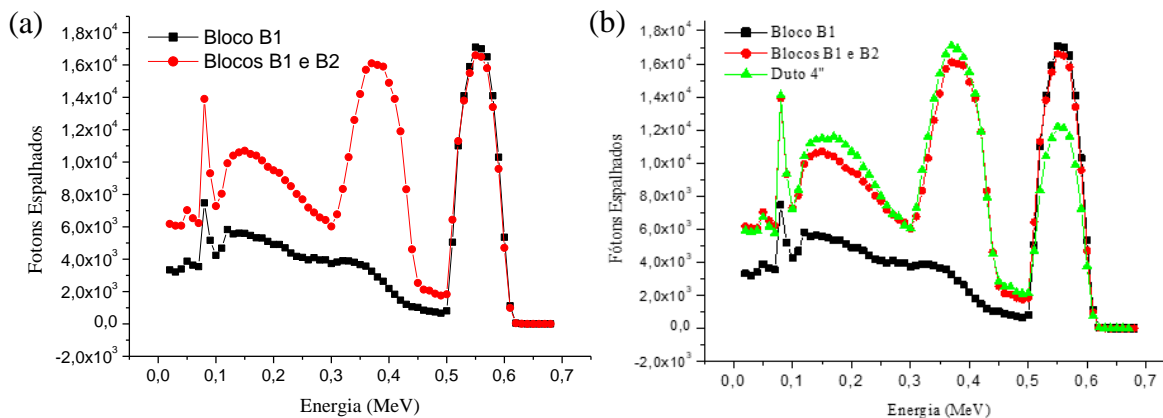


Figura 36: Estudo do espalhamento com dois blocos de aço carbono. (a) fótons espalhados detectados pelo detector a 135° da fonte no bloco B1 e B2 (b) comparação com o duto.

O mesmo estudo foi realizado com o detector da 90° da fonte de Césio-137 (ver figura 35), resultado obtido foi comparado ao valor teórico na Tabela 6, utilizando os ângulos aproximado de espalhamento de $70,3^\circ$ para o bloco B2 e $31,3^\circ$ para o bloco B1. Validando o resultado.

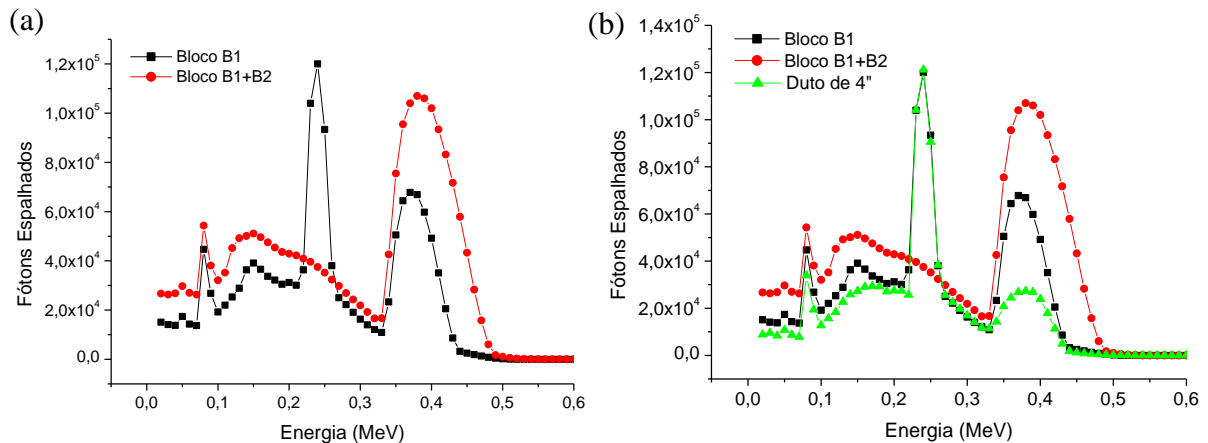


Figura 37: Estudo do espalhamento com dois blocos de aço carbono. (a) fótons espalhados detectados pelo detector a 90° da fonte no bloco B1 e B2 (b) comparação com o duto.

Tabela 6: Energia do Fóton espalhado teórico e simulado utilizando dois blocos de aço carbono API 5L Gr B e fonte de Césio-137.

DADOS	Detector a 135° da Fonte		Detector a 90° da Fonte	
	Bloco B1	Bloco B2	Bloco B1	Bloco B2
(MCNPX)	550 keV	360 keV	240 keV	370 keV
Teórico (Eq. 11)	557 keV	356 keV	234	376 keV
Erro Relativo (%)	1,3	1,12	2,48	1,67

4.3 AVALIAÇÃO DA INFLUÊNCIA DO GÁS NATURAL

O gás natural nas condições padrões de pressão e temperatura (1 atm e 20°C), a densidade absoluta é aproximadamente $0,00074 \text{ g/cm}^3$. Neste estudo, foi considerado a pressão interna do gás natural no duto de 50 kgf/cm^2 a temperatura de 20°C . Para o cálculo da densidade absoluta nestas condições, foram realizados:

1. Cálculo dos valores de temperatura e pressão pseudoreduzidas, através da média ponderada das propriedades críticas de seus componentes (Equações 6 e 7).

2. Determinação o valor de compressibilidade Z , através do gráfico de Standing-Katz (Fig.15).

3. Cálculo densidade absoluta, através da equação dos gases perfeitos (Equação 9).

O valor da densidade absoluta do gás natural calculado foi de $0,033181 \text{ g/cm}^3$. Através desta densidade, foi possível analisar a influência do gás nas simulações de transmissão e espalhamento a pressão de 50 kgf/cm^2 no código MCNPX. Como pode observar nas Figuras 38 e 39 (a) e (b) devido baixa densidade do gás natural, utilizando a fonte de Bário-133 houve uma redução de 4,33% dos feixes transmitidos na energia do fotopico em relação ao aço carbono e 5,83% os feixes espalhados na energia 80 keV e utilizando a fonte de Césio ocorreu a redução 2,22 % dos feixes transmitidos na energia do fotopico de 670 keV, nos feixes espalhados não houve alteração significativa.

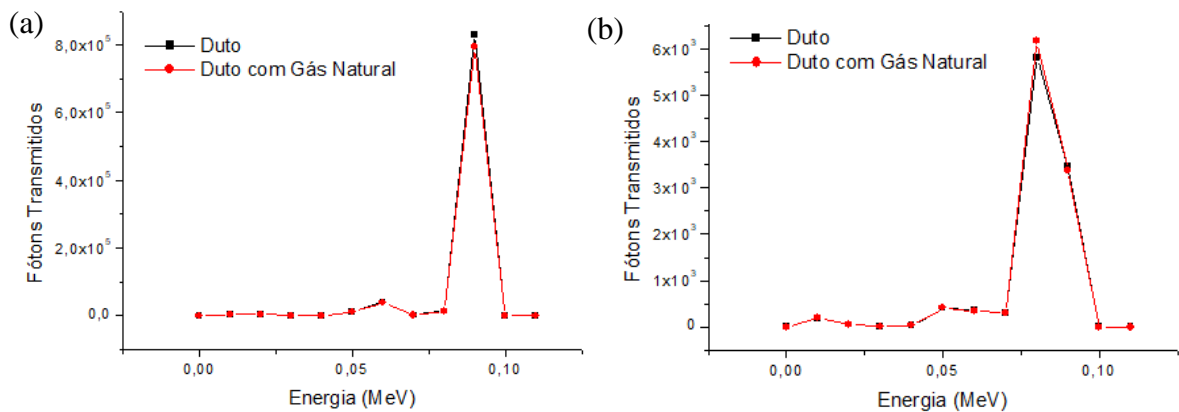


Figura 38: Influência do gás natural, com a fonte de Bário-133

(a) fótons transmitidos (b) fótons espalhados detectados pelo detector a 135° da fonte.

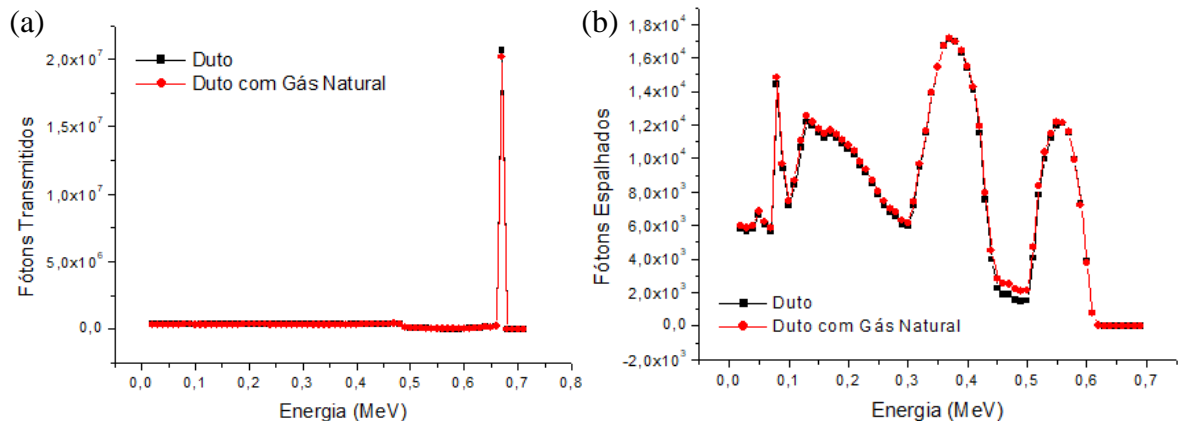


Figura 39: Influência do gás natural, com a fonte de Césio-137

(a) fótons transmitidos (b) fótons espalhados detectados pelo detector a 135° da fonte.

4.4 ESTUDO DAS FALHAS

Serão mostrados os resultados das simulações, utilizando os mesmos materiais, geometrias, corrosões e trincas citadas na metodologia, utilizando as fontes de Bário-133 com energia de 80,998 keV e Césio-137 de energia 662 keV.

4.4.1 Análise das corrosões utilizando feixes transmitidos.

As Figuras 40 (a) e (b) demonstram o comportamento dos fótons simulados no software MCNPX Visual Editor, utilizando feixe estreito com o ângulo de 18° de divergência e fonte de Bário-133.

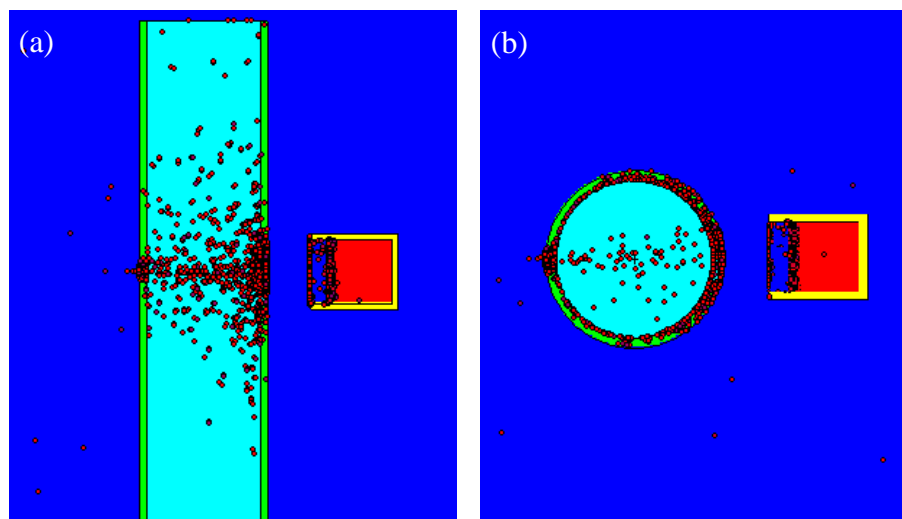


Figura 40: Comportamento dos fótons a um utilizando feixe estreito de 18° .

(a) vista lateral (b) vista frontal.

Como pode ser observado nas Figuras 41 e 42, foi possível identificar a diminuição da atenuação dos feixes transmitidos detectados pelo detector de NaI(Tl) a 180° da fonte Bário-133 de 80,998 keV e Césio-137 de 662 keV, em função do aumento da largura e espessura da corrosão respectivamente. Contudo devido a baixas energia a fonte de Bário-133 e predominância do efeito fotoelétrico, apresentou maior variação relativa em função o Césio-137.

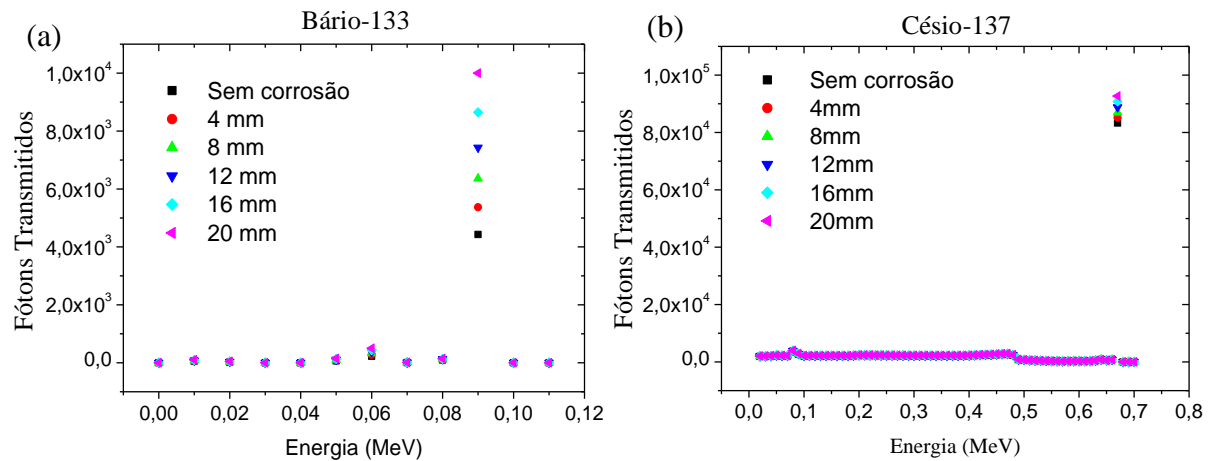


Figura 41: Fótons transmitidos em função da largura da corrosão.

(a) Fonte de Bário-133 (b) Fonte de Césio-137.

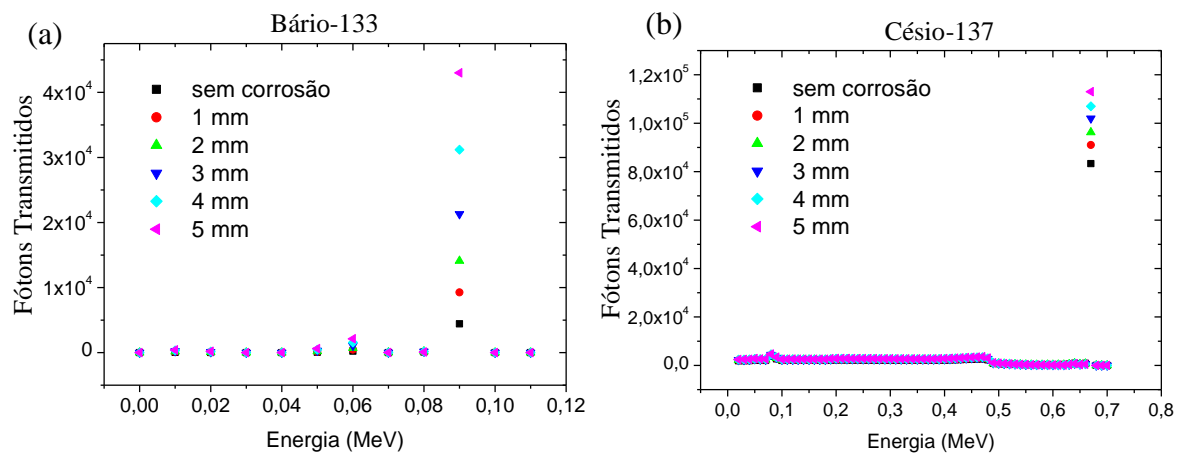


Figura 42: Fótons transmitidos utilizando em função da espessura da corrosão.

(a) Fonte de Bário-133 (b) Fonte de Césio-137.

Com base nos dados dos fótons transmitidos nos fotopicos, é possível representar o número de fótons em função da largura e espessura da corrosão, conforme ilustrado nas Figuras 43 e 44 respectivamente utilizando as fontes de Bário-133 e Césio-137. Considerando a incerteza como a raiz quadrada dos dados obtidos pelo MCNPX, foi possível identificar variações nos feixes transmitidos de 1 mm da largura da corrosão, utilizando a fonte da Bário-133 e 2 mm para a fonte de Césio-137. Em ambas as fontes foram mantidas a espessura e profundidade fixas de 2 mm e 50 mm respectivamente, conforme figura 24. Para a espessura foi possível determinar a perda de espessura de até 0,5 mm, mantendo as dimensões de profundidade e largura de 50 mm e 30 mm respectivamente, conforme, conforme Figura 25.

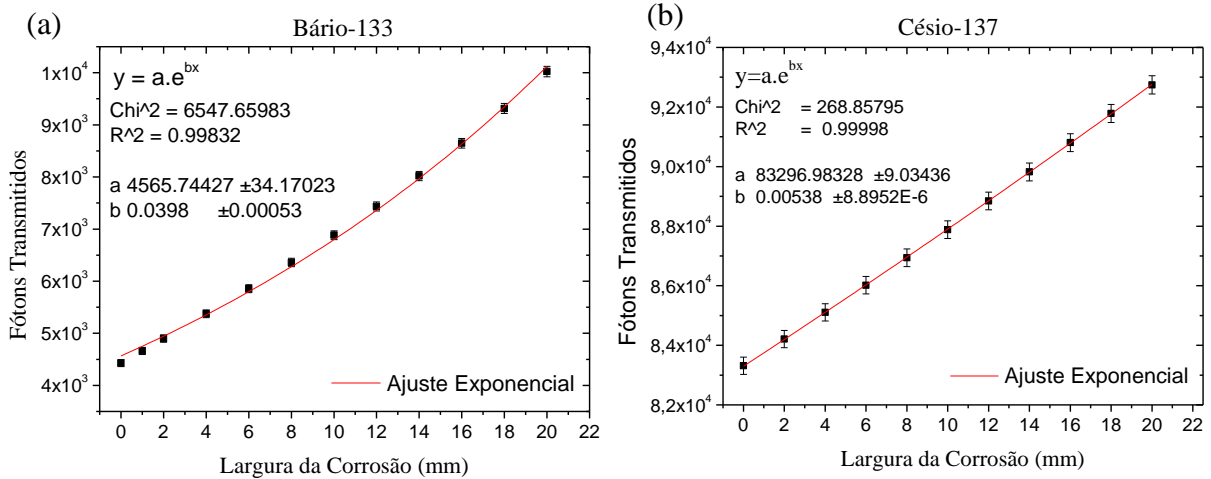


Figura 43: Fótons transmitidos detectados nos fotopicos em função largura da corrosão.

(a) Fonte de Bário-133 (b) Fonte de Césio-137.

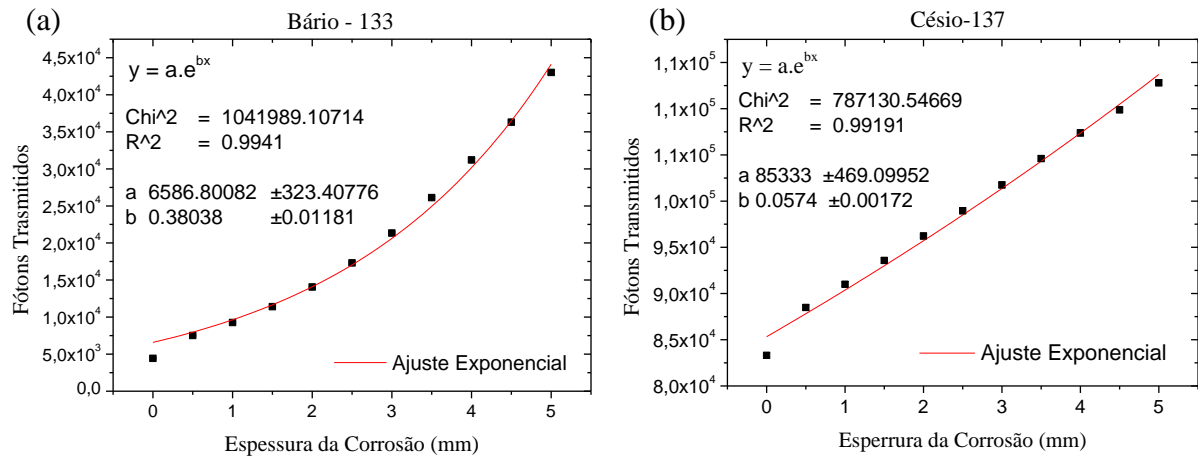


Figura 44: Fótons transmitidos detectados nos fotopicos em função espessura da corrosão.

(a) Fonte de Bário-133 (b) Fonte de Césio-137.

As perdas do material no duto ocasionado por corrosão podem ocorrer de diversos modos e dimensões. Com base nisto, utilizando as informações da variação da espessura e largura, foi possível relacionar número de fótons transmitidos em função do volume do material aço carbono perdido no duto ocasionada pela corrosão, conforme demonstrado na Figura 45. Nos volumes analisados, foi possível identificar dentro da incerteza determinada, a variação de perda do material aço carbono de $0,2 \text{ cm}^3$ utilizando a fonte de Bário e $0,4 \text{ cm}^3$ utilizando a fonte Césio-137.

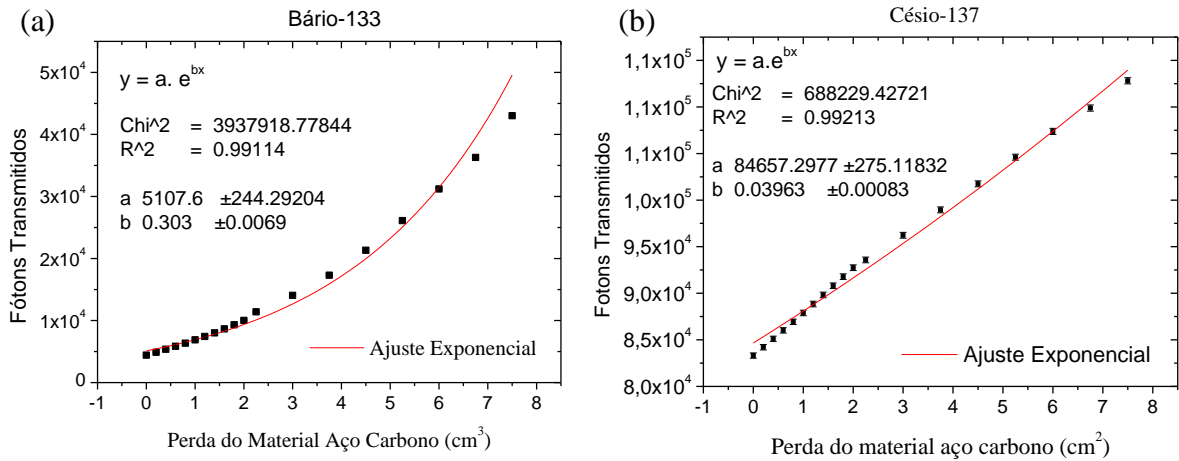


Figura 45: Relação entre os fótons transmitidos detectados nos fotopicos em função da perda do material carbono em cm^3 . (a) Fonte de Bário-133 (b) Fonte de Césio-137.

4.4.2 Análise das trincas utilizando feixes transmitidos.

Para análise das trincas foi realizada a variação da dimensão da extensão da trinca a passos de 5 mm. Como pode ser observado na Figura 46 e Tabela 7, foi possível identificar a diminuição da atenuação dos feixes transmitidos detectados pelo detector a 180° da fonte utilizando as fontes de Bário-133 e Césio-137.

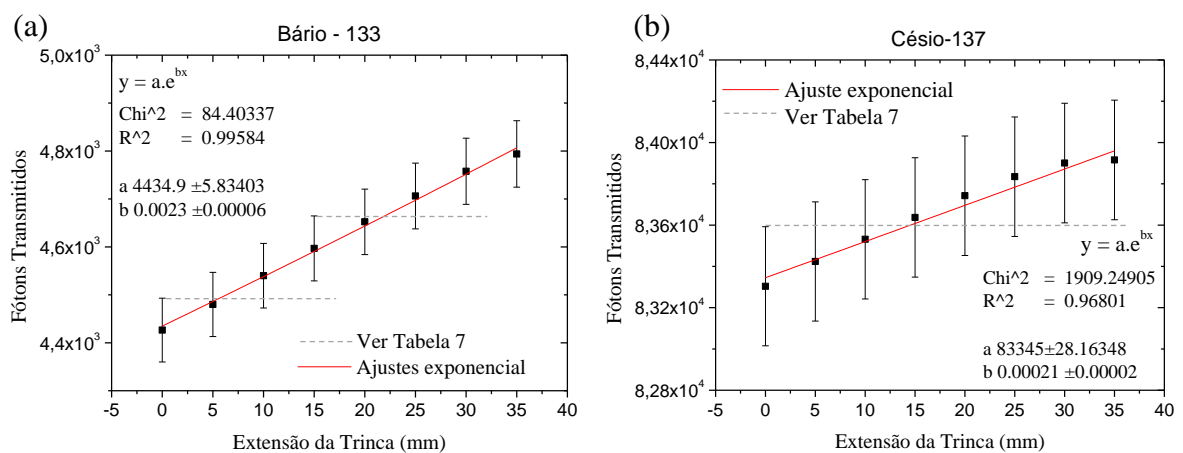


Figura 46: Relação entre os fótons transmitidos detectados nos fotopicos em função da extensão da trinca no material carbono, utilizando as fontes: (a) Bário-133 e (b) Césio-137.

As trincas são falhas dimensões muito pequenas dos materiais, no qual o isótopo de baixas energias como Bário-133 de 80,998 keV, por possuir maior coeficiente de atenuação em massa, conseguiu identificar extensões de 15 mm da trinca e enquanto para fonte de Césio-

137 foi possível identificar extensões de 30 mm. Estes resultados foram obtidos, considerando a incerteza, conforme indicados em vermelho na Tabela 7. Em função do ângulo sólido da fonte, foi possível observar a variação do número de contagens dos fótons transmitidos até 35 mm e 30 mm da extensão da trinca, utilizando as fontes de Bário-133 e Césio-137 respectivamente.

Tabela 7: Números de contagens considerando a incerteza, dos fótons transmitidos detectados pelo detector, em função da extensão da trinca.

Extensão [mm]	Bário-133			Césio-137		
	Contagem (-) Incerteza	Contagem	Contagem (+) Incerteza	Contagem (-) Incerteza	Contagem	Contagem (+) Incerteza.
0	4,360E+03	4,426E+03	4,493E+03	8,302E+04	8,330E+04	8,359E+04
5	4,413E+03	4,480E+03	4,547E+03	8,313E+04	8,342E+04	8,371E+04
10	4,473E+03	4,540E+03	4,607E+03	8,324E+04	8,353E+04	8,382E+04
15	4,529E+03	4,597E+03	4,665E+03	8,335E+04	8,364E+04	8,393E+04
20	4,584E+03	4,652E+03	4,720E+03	8,345E+04	8,374E+04	8,403E+04
25	4,638E+03	4,706E+03	4,775E+03	8,355E+04	8,383E+04	8,412E+04
30	4,689E+03	4,758E+03	4,827E+03	8,361E+04	8,390E+04	8,419E+04
35	4,725E+03	4,794E+03	4,863E+03	8,363E+04	8,392E+04	8,421E+04

4.4.3 Análise das corrosões utilizando feixes espalhados

O estudo das corrosões para análise dos feixes espalhados, foi necessário aumentar o número de contagens (NPS) no MCNPX, em virtude baixa contagem de fótons e elevação do erro no MCNPX, em relação aos fótons transmitidos. Nas Figuras 47 e 48 (a) e (b) representam os espectros dos fótons espalhados detectados pelo detector a 135° da fonte, pode-se observar que a fonte de Césio-137 apresentou melhor variação relativa que fonte de Bário-133.

Com base nos dados dos fótons espalhados dos picos de energia de 80 keV para a fonte de Ba-133 e 360 keV para a fonte de Césio-137, é possível representar o número de fótons espalhados detectados pelo detector 135° da fonte, em função da largura e espessura da corrosão, conforme ilustrado nas Figuras 49 e 50 (a) e (b) respectivamente.

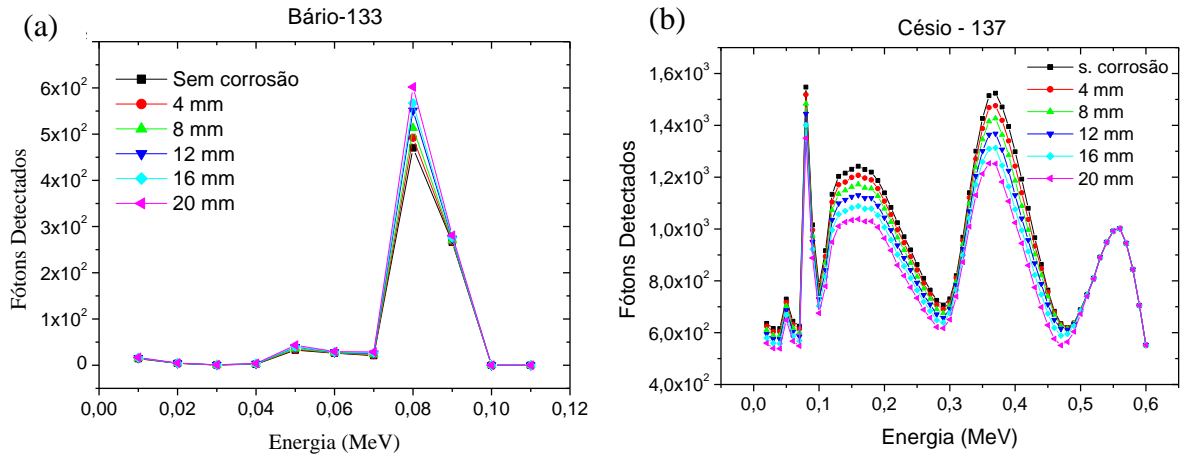


Figura 47: Fótons Espalhados em função da largura da corrosão detectados pelo detector a 135° das fontes: (a) Bário-133 (b) Césio-137

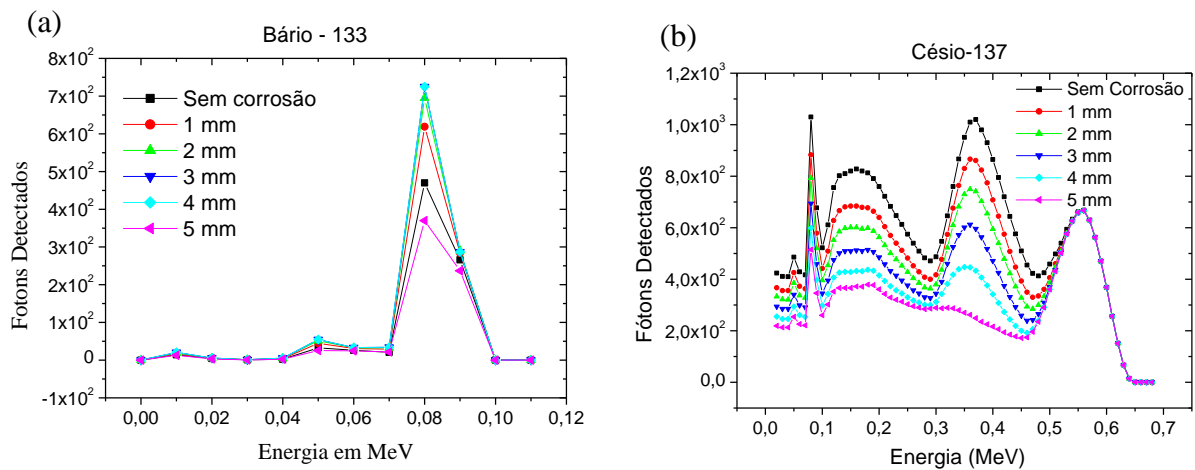


Figura 48: Fótons Espalhados em função da espessura da corrosão detectados pelo detector a 135° das fontes: (a) Bário-133 (b) Césio-137

Pode ser observado nas Figuras 49 e 50, que o comportamento número de fótons espalhados são diferentes para ambas as fontes. Utilizando a energia de Césio-137 de 662 keV, há uma redução dos fótons espalhados em função do aumento da perda do material do aço carbono do duto, enquanto para a fonte de Bário-133 com energia 80,998 keV, o números de fótons espalhados aumenta com a perda do material do duto, isso porque, devido a baixa energia da fonte de Bario-133, o efeito fotoelétrico no duto é preponderante, a medida que a espessura da parede do duto diminui, decorrente do aumento da corrosão, o feito fotoelétrico ocasionado pelo duto diminui e há um aumento do número de fótons espalhados. Conforme Figura 50 (a), acima de uma corrosão de 3,5 mm de perda de espessura, há uma diminuição no número de contagens de fótons espalhados e um aumento no número de fótons transmitidos. Diante deste

resultado, os números de contagens de espalhamentos utilizando a fonte de Bário-133, serão próximos para uma corrosão de 0,5 mm e 4,5 mm.

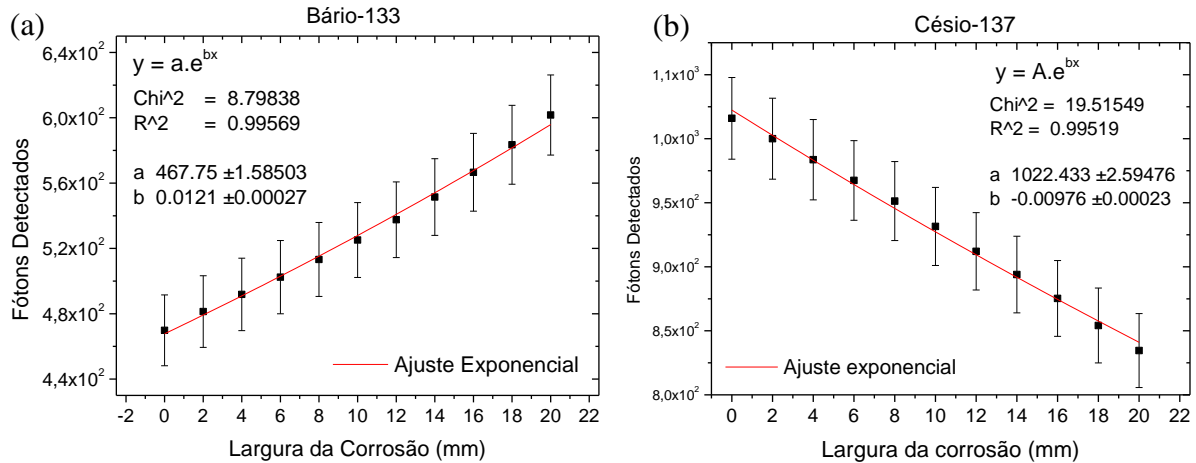


Figura 49: Fótons espalhados detectados nos picos em função largura da corrosão.

(a) Bário-133, 80 keV (b) Césio-137, 360 keV.

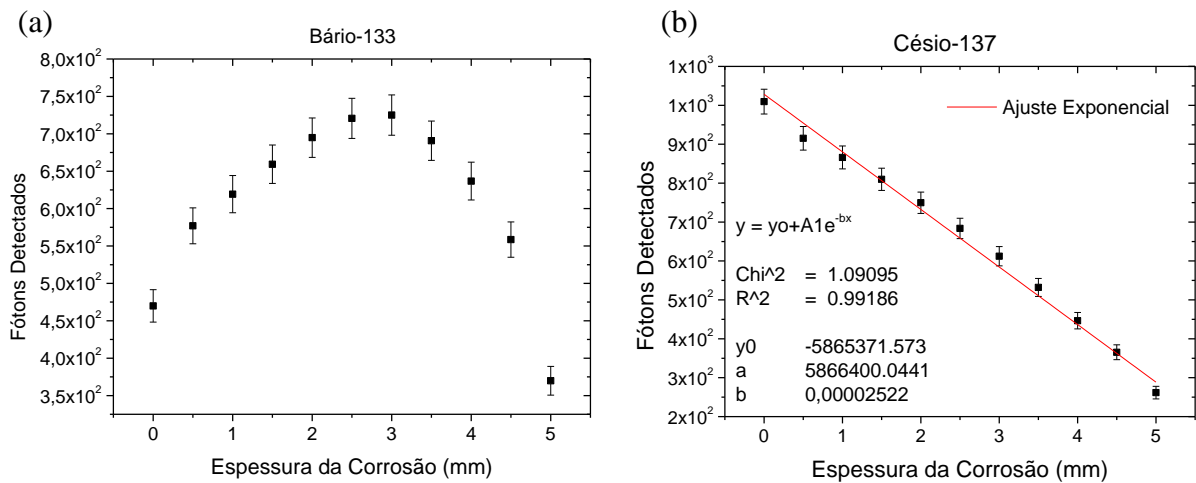


Figura 50: Fótons espalhados detectados nos picos em função espessura da corrosão

(a) Bário-133, 80 keV (b) Césio-137, 360 keV.

Nos dados analisados das contagens dos fótons espalhados, foi possível identificar dentro da incerteza determinada, a variação de 8 mm da largura da corrosão e 0,5 mm da espessura para a fonte de Césio-137, utilizando os dados na energia de 360 keV. Para o estudo da largura da corrosão foram mantidas a espessura e profundidade fixas de 2 mm e 50 mm respectivamente, conforme figura 24 e para o estudo da espessura foram mantidas as dimensões de profundidade e largura de 50 mm e 30 mm respectivamente, conforme Figura 25. Devido a redução do número de contagem dos fótons espalhados a partir de 3,5 mm de espessura

utilizando a energia 80,998 keV da fonte Bário-133, não é possível correlacionar somente uma medição da perda do material, em função de um número de contagem estabelecido.

Nas figuras 51 (a) e (b), são utilizadas as informações da variação da espessura e largura, para relacionar número de fótons espalhados em função do volume do material aço carbono perdido no duto ocasionada pela corrosão. Nos volumes analisados, foi possível identificar dentro da incerteza determinada, a variação de perda do material aço carbono de 0,8 cm³ utilizando a fonte de Césio-137, utilizando o Bário-133 não foi possível determinar em função da redução do número de contagens a partir de 3,5 mm de perda de espessura.

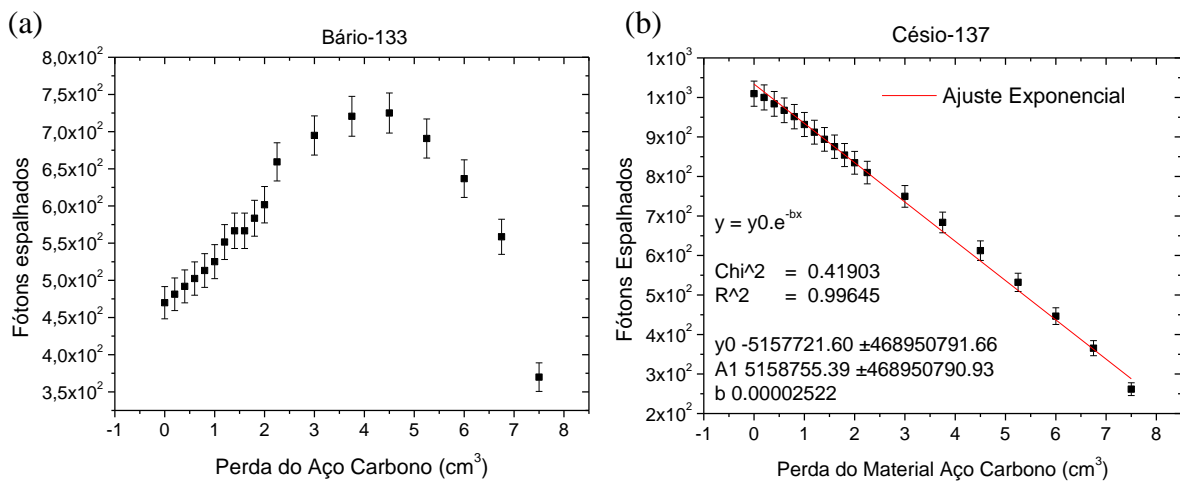


Figura 51: Relação entre os fótons espalhados detectados nos picos em função da perda do material carbono em cm³ (a) Bário-133 (b) Césio-137.

4.4.4 Análise das trincas utilizando feixes espalhados

Como pode ser observado na Figura 52, o modelo apresentou pequena variação na contagem dos fótons espalhados detectados pelo detector a 135° da fonte Césio-137, considerando a incerteza, não foi possível detectar as trincas utilizando a técnica de espalhamento nas geometrias estudadas com a fonte. A fonte Bário-133, não apresentou variação nas contagens.

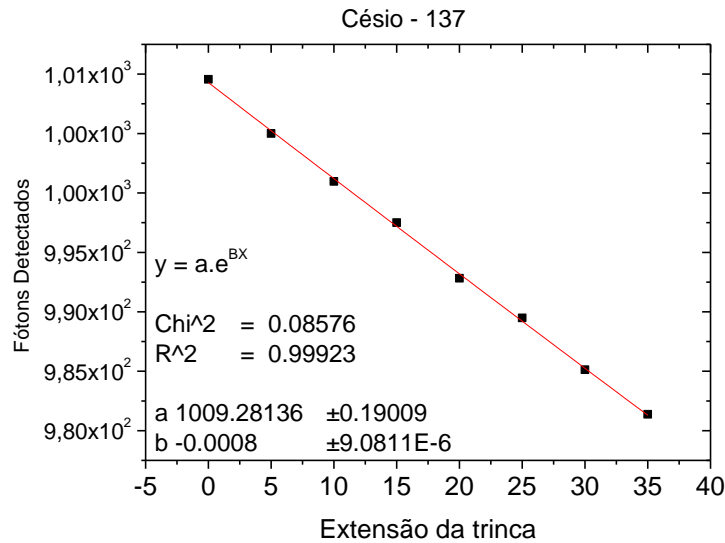


Figura 52: Relação entre os fótons espalhados, detectados nos fotopicos em função da extensão da trinca no material carbono, utilizando a fonte Césio-137.

4.4.5. Determinação da localização da corrosão na circunferência do duto.

Para determinação da localização da falha do duto, foram analisados inicialmente o espectro de energia dos fótons espalhados detectados pelo detector D1, com diferentes posições de uma corrosão de dimensões 20 x 50 x 2mm (largura, altura e espessura), conforme Figura 53. Observado que há variação do número de contagens, nos dois picos de energias 240 keV e 370 keV, gerados pelo espalhamento a 90°. Desta forma, foram levantados os picos de energia detectados pelos detectores D1 e D2 e correlacionados os resultados obtidos entre os dois detectores, para analisar a localização da corrosão.

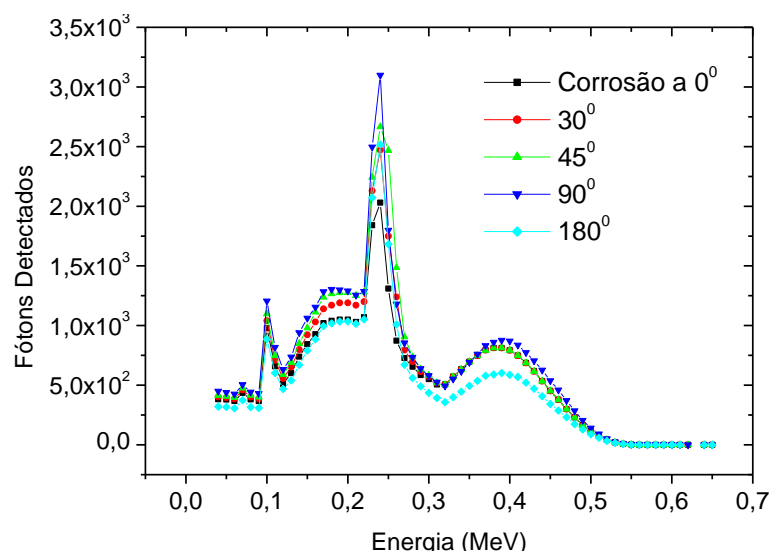


Figura 53: Espectro do detector D1, para análise da localização da falha no gasoduto.

Como pode ser observado nas Figuras 54 (a) e (b), há uma elevação do número de fótons espalhados no Detector 1, a medida que a corrosão se aproxima do detector 1. Na corrosão localizada a 0° ocorre o mesmo número de contagens nos dois detectores D1 e D2 na energia 240 keV, a 30° e 45° ocorre a elevação das contagens para o detector 1 superior ao detector 2, a 90° há o aumento da contagem no detector 1 e no detector 2 não há alteração do número de contagens. A corrosão a 180° há uma redução para o mesmo número de contagens na energia 370 keV nos dois detectores. Desta forma, podemos verificar que é possível determinar a localização utilizando dois detectores a 90° da fonte, estudando as duas alturas de energia 240 keV e 370 keV.

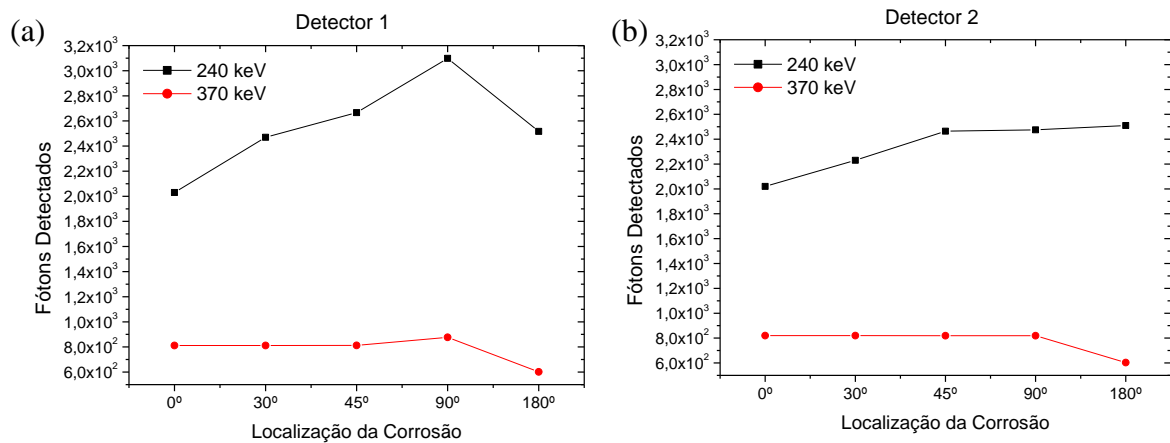


Figura 54: Número de contagens dos fótons espalhados detectados pelos detectores em função da falha (a) Detector 1 e (b) Detector 2.

CAPÍTULO V

5 – CONCLUSÕES

Neste trabalho foi apresentada metodologia de estudo para detecção de corrosões e trincas em gasodutos, através da técnica de transmissão e espalhamento de raios gamas. Para o melhor resultado, considerou-se a influência do duto e do gás natural nos feixes transmitidos e espalhados.

Os modelos matemáticos foram desenvolvidos por meio do código MCNPX e as distribuições de altura de pulsos referentes aos detectores que registram os feixes de espalhamento, foram investigadas e validadas por equações analíticas, obtendo valores satisfatórios com desvios inferiores a 2,5%.

Com base nos resultados da geometria de transmissão, a fonte de Bário-133 com energia 80,998 keV, apresentou melhores resultados que a fonte Césio-137. Utilizando a fonte de Bário-133, foi possível detectar 15 mm de extensão de uma trinca de 0,5 mm de abertura, 0,5 mm de perda de espessura ocasionada por corrosão interna e 1 mm de largura de uma corrosão, sendo a perda de material constituído de aço carbono de $0,2 \text{ cm}^3$, enquanto a fonte de Césio-137, foi possível detectar 30 mm de extensão de uma trinca de 0,5 mm de abertura, 0,5 mm de perda de espessura ocasionada por corrosão interna e 2 mm de largura de uma corrosão, sendo a perda de material constituído de aço carbono de $0,4 \text{ cm}^3$.

No modelo para o estudo dos feixes espalhados, a fonte de Césio-137 apresentou melhores resultados que a do Bário-133. Utilizando a fonte de Césio-137, foi possível detectar 0,5 mm de perda de espessura ocasionada por corrosão interna e 8 mm de largura de uma corrosão, sendo a perda de material de constituído de aço carbono de $0,8 \text{ cm}^3$. Neste modelo, a fonte de Bário-133, apresentou o mesmo número de contagens na perda de espessura de 0,5 mm e 4,5 mm do gasoduto. Não sendo portanto, uma fonte adequada para esta geometria. Na geometria do espalhamento não foi possível identificar as trincas de extensões até 35 mm.

Estudo com diferentes localizações das falhas na circunferência do gasoduto foram realizadas, utilizando dois detectores a 90°, obtendo êxito nos resultados, analisando as alturas dos feixes espalhados, nas faixas de energia de 240 keV e 370 keV.

A metodologia foi capaz de identificar as trincas e corrosões usando a técnica de transmissão, a partir de um sistema formado por uma fonte de raios gama de Ba-133 e Cs-137 e um detector cintilador 2x2'' de NaI(Tl) e as corrosões usando a técnica de espalhamento e fonte de raios gama Cs-137.

Como trabalhos futuros ficam as seguintes propostas:

- Validação experimental dos modelos elaborados;
- Estudar mecanismos para a realização de varredura no gasoduto, tanto circunferencial, quanto longitudinal, para ser implementado no modelo experimental;
- Realizar mais simulações com diferentes trincas e corrosões, para a utilização de redes neurais artificiais;
- Utilização de redes neurais artificiais para identificar sua localização da falha.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

API, Specification for Line Pipe – Specification 5L, 44th Edition, American Petroleum Institute, Washington, 2000.

ACHMAD B. e HUSSEIN E.M.A., “An X-ray Compton scatter method for density measurement at a point within an object”, Applied Radiation and Isotopes, 60, pp. 805-814 (2004).

ANJOS, M.J. LOPES, R.T. e BORGES, J.C., “Compton scattering of gamma-rays as surface inspection technique”. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A 280 pp. 535-538 (1989).

ANJOS, M.J. LOPES, R.T. e BORGES, J.C., “Compton scattering of gamma-rays as surface inspection technique”. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A 280 pp. 535-538 (1989).

ALMEIDA J. P., análise de falha e gerenciamento de riscos associados aos dutos de gás natural à alta pressão, 2011.

ARENDSZ, N.V. e HUSSEIN, E.M.A., “Energy-spectral Compton scatter imaging. I. Theory and mathematics”. IEEE Transactions on Nuclear Science NS-42 pp. 2155-2165 (1995).

ASME B31G, Manual for Determining the Remaining Strength of Corroded Pipelines, A supplement to ANSI/ASME B31 Code for Pressure Piping, New York, 1991.

ASTUTO, A., Desenvolvimento de um Sistema de Inspeção de Tubos usando a técnica de Transmissão Gama, M.Sc, COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, Brasil, 1995.

BEIGZADEH A., AFARIDEH H., ASADI E, Z. SOLTANI e R.E.T. GHOLAM REZA, An Optimized Gamma-ray Densitometry Tool for Oil Products Determination, 2013.

BERGER M.J. e SELTZER S.M., “Response functions for sodium iodide scintillation detectors”, Nuclear Instruments and Methods, 104, pp. 317-332 (1972).

BERMAN, A.I. e HARRIS, J.N., “Precision Measurement of Uniformity of Materials by Gamma Ray Transmission”, Review Scientific Instruments, V. 25, n. 1, pp. 21-29, January, 1954.

CAMERINI, C. G., Sistema de Inspeção para Detecção de Trincas de Fadiga em Juntas Soldadas de Dutos Metalurgicamente Cladados, PhD.Eng, COPPE-UFRJ, Rio de Janeiro, Brasil, 2018.

CARLOS H.F.O e CLAUDIO S.C. - PIG instrumentado da PETROBRÁS, Resultados e Perspectivas, p.9, agosto/2002. XXI Congresso Nacional de Ensaios Não Destrutivos.

CARTER, DAVID A., Aspects of risk assesment for hazardous pipelines containing flammable substances, 1991.

CETESB – Companhia de Tecnologia de Saneamento Ambiental (<http://www.cetesb.sp.gov.br/gerenciamento-de-riscos/emergenciasquimicas/137-principais-acidentes-em-14/fev/2012>)

DRAKE, S. G.; SEWARD, J. C., Radiographic Detection of Pipe Corrosion Under Lagging, GB Patent Document , UK., July. 1989.

EUROPEAN GAS PIPELINE INCIDENT DATA GROUP, Gas pipeline incidents, Fourth report 1970–1998, <http://www.egig.nl/>

FERNANDES P.E.A., Avaliação da tenacidade à zona afetada pelo calor do aço API 5L X80 soldado pelos processos SMAW e FCAW, PhD.Eng, São Paulo, Brasil, 2011.

FREIRE J. “Engenharia de dutos. Rio de Janeiro”. Editora: ABCM, 2009.

FINDLEY, W., A theory for the effect of mean stress on fatigue of metals undercombined torsion and axial load or bending., Nova Iorque: Journal ofEngineering for Industry, Transactions of the ASME, 1959, pp. pp. 301-309.

FORSYTH P. J., Proceedings of the crack propagation symposium, Cranfield: The College of Aeronautics, 1, 76–94. 1962.

GENTIL, V., Corrosão - 4ª edição, Livros Técnicos e Científicos. Editora S.A, 2003.

I.L.M. SILVA, R.T. LOPES e E.F.O. DE JESUS, “Tube defects inspection technique by using Compton gamma-rays backscattering” Progress in Nuclear Energy (1999).

JAHANBAKHS, O., ASHRAFI, S., SALEHPOUR, B., BODAGHI H.A. R. e KHAIATALI N., “Industrial scattering densitometry using a mCi gamma-ray source”. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A726, pp. 47–51 (2013).

KHORSANDI M. e FEGHHI S.A.H., “Design and construction of a prototype gamma-ray densitometer for petroleum products monitoring applications”. Measurement, 44, pp. 1512-1515, (2011).

KHORSANDI M., FEGHHI, S.A.H., SALEHIZDEH, A. e ROSHANI, G.H., “Developing a gamma Ray fluid densitometer in petroleum products monitoring applications using artificial neural network”. Radiation Measurements, 59, pp. 103-187 (2013).

KNOLL, Glenn F. “Radiation Detection and Measurement”, Second Edition, John Wiley & Sons Inc., 1989.

LANL, MCNP – A general Monte Carlo n-particle transport code, Los Alamos National Laboratory, version 5, I: Overview and Theory, U.S.A., 2003.

LOPES, R.T., VALENTE, C.M.I. DE JESUS, E.F.O. e CAMERIN, C.S., “Detection of paraffin deposition inside a draining tubulation by the Compton Scattering Technique”. Applied Radiation and Isotopes 48, pp. 1443-1450 (1997).

MAUCEC, M. e DENIJS, I., “Development and calibration of a gamma-ray density meter for sediment-like materials”. Appl. Radiat. Isot., 67, pp. 1829-1836, (2009).

MAINIER, F. B., Material do curso Corrosão e Inibidores. In: Instituto Brasileiro de Petróleo, Rio de Janeiro, Brasil, 2001.

M. MARGRET, M. MENAKA, V. SUBRAMANIAN, R. BASKARAN, B e VENKATRAMAN, Non-destructive inspection of hidden corrosion through Compton Back Scattering technique, paper, (2018).

MI, Y., ISHII, M. e TSOUKALAS, L.H., “Vertical two-phase flow identification using advanced instrumentation and neural networks”. Nuclear Engineering and Design, 184, pp.409-420 (1998).

MONNO, A., “Tube Wall Thickness”, GB Patent Document 2146115/A/, GB Patent Application 8323913, Int. Cl. G01B 15/02, 9 p., April (1985).

NATIONAL TRANSPORTATION SAFETY BOARD “Columbia Gas Transmission Corporation Pipeline Rupture Sissonville, West Virginia December 11, 2012”, Accident Report, NTSB/PAR-14/01 (2014).

NIST, 2010, Disponível online: <http://physics.nist.gov/xaamdi> [2004], acesso em 04/03/2019.

NUNES L. P., DUTRA A. C., Proteção Catódica - Técnica de Combate à Corrosão. Editora: Interciência, 2006.

OLIVEIRA E. C., AGUIARI P. F., Comparação de diferentes abordagens para avaliação da incerteza na cromatografia gasosa do gás natural. Quím. Nova, v.32, n.6, São Paulo, 2009.

OLIVEIRA D. F., NASCIMENTO J. R., MARINHO C. A., LOPES R. T., Gamma transmission system for detection of incrustation in oil exploration pipelines, Nuclear Instruments and Methods in Physics Reserch A, Rio de Janeiro, RJ, Brazil, 2014.

PEIXOTO, P. N. B., Determinação de frações de volume em fluxos bifásicos óleo-gás e água-gás utilizando redes neurais artificiais e densitometria gama, M.Sc, Instituto de Engenharia Nuclear, IEN-RJ, Rio de Janeiro, RJ, Brasil, 2016.

PELOWITZ D.B., MCNP-X TM User’s Manual, Version 2.5.0, LA-CP-05-0369, Los Alamos National Laboratory (2005).

PETROBRAS TRANSPORTE S.A (TRANSPETRO). Relatório Anual, (2014).

PENAVILLA, A. O., uma metodologia Monte Carlos para projeto de gasodutos e carbodutos (2011).

S.M. GOLGOUN, D. SARDARI, M. SADEGHI e F.BABAPOUR MOFRAD, Applied Radiation and Isotopes, article, (2016).

SALGADO, C. M., PEREIRA, C. M., SHIRRU, R., & BRANDÃO, L. E.. Flow regime identification and volume fraction prediction in multiphase flows by means of gamma-ray attenuation and artificial neural networks. Progress in Nuclear Energy , 52, pp. 555-562, 2010.

SALGADO C.M., BRANDÃO L.E.B., PEREIRA C.M.N.A., SCHIRRU R., RAMOS R. E SILVA A.X., “Prediction of volume fractions in three-phase flows using nuclear technique and artificial neural network”, Applied Radiation and Isotopes, 67, pp. 1812-1818 (2009).

SANTOS, M. V. C., Análise de Fadiga em Dutos Danificados (2015), M.Eng, COPPE -UFRJ, Rio de Janeiro, Brasil, 2015.

SHARAF, J.M., “Practical aspects of Compton scatter densitometry”. Applied Radiation and Isotopes 54, pp. 801-809 (2001).

SILVA I.L.M., LOPES R.T., JESUS E.F.O., “Tube defects inspection technique by using Compton gamma-rays backscattering”. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A 422, pp. 957-963 (1999).

SILVA M. A., A utilização de 3 PIG`s na inspeção e manutenção de dutos. ano 2, n.1, p.38-52, nov.2014/fev.2015. Revista tecnologia & informação - ISSN 2318-9622.

SILVA P. N., SILVA O. P., SALVADOR A. D., TONIOLO R. I., Avaliação de Aanos por H2S em Tubulações de Aço Carbono API 5L GR B e API 5 LX 42 de Linhas de Gás, Contribuição técnica ao 69º Congresso Anual da ABM, São Paulo, SP, Brasil, 2014.

SILVA E.G e OLIVEIRA G . S . F, Integridade Estrutural e Avaliação da Corrosão de Dutos Por Métodos Semi-Empíricos, Vitória, 2013.

TAUHATA, L., SALATI, I.P.A., PRINZIO, R.DI., PRINZIO, M.A.R.R.DI., Radioproteção e Dosimetria: Fundamentos, Instituto de Radioproteção e Dosimetria, Comissão Nacional de Energia Nuclear, 5ª revisão, Rio de Janeiro, 2003.

TAUHATA, L., SALATI, I.P.A., PRINZIO, R.DI., PRINZIO, M.A.R.R.DI., Radioproteção e Energia Nuclear, 10ª revisão, Rio de Janeiro, 2014.

TRANSPORTADORA BRASILEIRA GASODUTO BOLÍVIA – BRASIL S.A. (TBG) - Relatório Integrado de atividades, (2011).

TEIXEIRA, T.P., Use of transmission gamma for study of calculation of scale in oil pipelines, INTERNATIONAL NUCLEAR ATLANTIC CONFERENCE - INAC, Belo Horizonte, MG, Brazil, 2017.

Y.-D. JO e B.J AHN, Analyses of hazard area associated with high pressure natural-gas pipeline, J. Loss Prev. Process Ind. 15, p. 179 - 182,2002.

VAZ, C.E.M.; MAIA, J.L.P.; SANTOS e W.G.; Tecnologia da Indústria do Gás Natural; Blucher, 1ª.Edição, São Paulo, 2008, p341. Dosimetria: Fundamentos, Instituto de Radioproteção e Dosimetria.

WILLIAMS GAS CO. e CARRIE J. SIDENER , Hazardous Materials Safety Administration (PHMSA) <https://inspecaoequipto.blogspot.com/2013/11/caso-045-ruptura-de-gasoduto-em.html>. (2013).