



ESPECTRO SELETIVO ANGULAR DE ESPALHAMENTO EM TUBO *RISER*
FLEXÍVEL

Cintia Guimarães Ferreira

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-graduação em Engenharia Nuclear, COPPE, da Universidade Federal do Rio de Janeiro, como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Mestre em Engenharia Nuclear.

Orientador: Ricardo Tadeu Lopes

Rio de Janeiro
Fevereiro de 2015

ESPECTRO SELETIVO ANGULAR DE ESPALHAMENTO EM TUBO *RISER*
FLEXÍVEL

Cintia Guimarães Ferreira

DISSERTAÇÃO SUBMETIDA AO CORPO DOCENTE DO INSTITUTO ALBERTO LUIZ COIMBRA DE PÓS-GRADUAÇÃO E PESQUISA DE ENGENHARIA (COPPE) DA UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO DE JANEIRO COMO PARTE DOS REQUISITOS NECESSÁRIOS PARA A OBTENÇÃO DO GRAU DE MESTRE EM CIÊNCIAS EM ENGENHARIA NUCLEAR.

Examinada por:

Prof. Ricardo Tadeu Lopes, D.Sc.

Prof. Edgar Francisco Oliveira de Jesus, D.Sc.

Prof. Walsan Wagner Pereira, D.Sc.

RIO DE JANEIRO, RJ - BRASIL
FEVEREIRO DE 2015

Ferreira, Cintia Guimarães

Espectro seletivo angular de espalhamento em tubo Riser flexível / Cintia Guimarães Ferreira – Rio de Janeiro: UFRJ/COPPE, 2015.

IX, 117 p.: il.; 29,7 cm.

Orientador: Ricardo Tadeu Lopes

Dissertação (mestrado) – UFRJ / COPPE / Programa de Engenharia Nuclear, 2015.

Referências Bibliográficas: p. 99-101.

1. Espalhamento Compton. 2. Radiação X. 3. Ensaio Não Destrutivo. I. Lopes, Ricardo Tadeu II. Universidade Federal do Rio de Janeiro, COPPE, Programa de Engenharia Nuclear. III. Título.

*“Um ser humano não se sente privado das
glórias as quais nunca sonhou aspirar.”*

AGRADECIMENTOS

A realização deste trabalho, direta ou indiretamente, carrega a contribuição da existência de cada pessoa presente em minha vida.

Ao Professor Ricardo Tadeu Lopes pela oportunidade, amizade, orientação e ensinamentos que contribuíram para a realização deste trabalho.

Ao corpo docente e funcionários do Programa de Engenharia Nuclear (PEN).

Ao Laboratório de Instrumentação Nuclear.

Ao Professor e amigo Carlos Roberto Ferreira de Castro, pela amizade e dedicação. Pelos ensinamentos, pelo incentivo, por acreditar, e, me fazer acreditar, que sou capaz.

Aos meus Professores de Graduação, Achilles Astuto, Ubiratan Barbosa e Simone Fernandes, pela amizade.

Aos amigos e funcionários do LIN pela amizade e acolhimento. A Alessandra Machado por sempre estar disposta a me ajudar. Ao Carlos Alberto, Celene, Josué, Marques, Osmar, Otacílio e Sandro por toda amizade e apoio. Ao Átila, Alessandra Castro, Célio, Haimon, Jô, Soraia e Thaís por compartilharem seus conhecimentos comigo. Ao Professor Davi e ao Professor Marcelino por colaborarem na montagem do experimento. Ao Professor Edgar pelas contribuições neste estudo.

A Suzana pela gentileza, amizade e senso de humor. Sua presença me alegra.

Ao Fagner, pelo respeito, compreensão e pelas palavras de incentivo.

Aos meus pais, Hélio e Maria. Aonde quer que eu vá e o que quer que eu faça, eles sempre estarão ao meu lado. Eternos em mim.

A Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (Capes) e ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) pelo apoio financeiro.

Resumo da Dissertação apresentada à COPPE/UFRJ como parte dos requisitos necessários para a obtenção do grau de Mestre em Ciências (M.Sc.)

ESPECTRO SELETIVO ANGULAR DE ESPALHAMENTO EM TUBO *RISER* FLEXÍVEL

Cintia Guimarães Ferreira

Fevereiro/2015

Orientador: Ricardo Tadeu Lopes

Programa: Engenharia Nuclear

Este trabalho propõe a utilização da técnica de espalhamento Compton como Ensaio Não Destrutivo na inspeção de *riser* flexível em situação de alagamento. Esses tubos têm sido considerados a parte crítica do sistema, pois são indispensáveis na extração de petróleo em águas profundas e ultraprofundas, e a presença de defeitos ocasiona prejuízos ambientais e financeiros. Para a realização do estudo foi utilizado um sistema de espectrometria de raios X a base de um detector semicondutor de cristal de telureto de cádmio (CdTe) posicionado a 60 e 70° de uma fonte de raios X com tensão máxima de 50 kVp, alcançando um ângulo de espalhamento de 250°. Foi utilizado como corpo de prova, uma seção de *riser* flexível de diâmetro de 4 polegadas. O corpo de prova simulou situações de *riser* normal e alagado, com a introdução de água no seu interior. A amostra de *riser* flexível foi varrida em diferentes profundidades, em passos de 1mm cada, nas condições sem água, com água potável e com água do mar, respectivamente. A partir da obtenção dos espectros, causados pelo espalhamento na amostra, foi possível analisar em que condições encontrava-se o tubo (sem água ou com água), bem como definir parâmetros futuros para estudo e aperfeiçoamento da aplicação desta técnica para inspeção em *risers* flexíveis.

Abstract of Dissertation presented to COPPE/UFRJ as a partial fulfillment of the requirements for the degree of Master of Science (M.Sc.)

SELECTIVE ANGULAR SPECTRUM OF SCATTERING IN FLEXIBLE RISER PIPE

Cintia Guimarães Ferreira

February/2015

Advisor: Ricardo Tadeu Lopes

Department: Nuclear Engineering

The aim of this work is the use of Compton scattering technique as a nondestructive testing in flexible riser inspection in a flood scenario. These pipes have been considered a critical part of the system, as they are essential in deep and ultra-deepwater oil drilling, besides the presence of defects causes environmental and financial losses. In this study an X-Ray spectrometry system based on a semiconductor detector of cadmium telluride was used and positioned at 60 and 70° from a X-Ray source with maximum tension of 50 kVp, reaching a scattering angle of 250°. A section of flexible riser of 4 diameter was used as a specimen. The specimen simulated a scenario of normal and flooded riser introducing water inside it. The flexible riser sample was scanned in different depths in steps of 1mm each, in conditions without water, with potable water and sea water, respectively. By obtaining the spectra caused by the scattering in the sample, it was possible to analyze in what conditions the pipe was (with or without water) as well as to define future parameters for studying and improvement of this technique in flexible risers.

ÍNDICE

CAPÍTULO I	1
INTRODUÇÃO	1
CAPÍTULO II	12
CONSIDERAÇÕES TEÓRICAS	12
II.1. PRODUÇÃO DE RAIOS X	12
II.1.1. Radiação de freamento	13
II.1.1.1. Cálculo do comprimento de onda mínimo (λ_{\min}) do raio x emitido (energia máxima)	14
II.1.2. Raios x característicos	16
II.1.3. Atenuação dos raios x	18
II.1.3.1. Atenuação de um feixe de radiação monoenergética	19
II.1.3.2. Atenuação de um feixe de radiação polienergética.....	21
II.2. EFEITO FOTOELÉTRICO	22
II.2.1. Distribuição angular dos elétrons	26
II.3. ESPALHAMENTO COMPTON	27
II.3.1. Seção de choque de espalhamento Compton	31
II.3.2. Intensidade do feixe espalhado	32
CAPÍTULO III	36
MATERIAIS E MÉTODOS	36
III.1. FONTE DE RADIAÇÃO X	36
III.2. SISTEMA DE DETECÇÃO	37
III.3. AS AMOSTRAS	37
III.3.1. Amostra 1: tubo plástico	37
III.3.2. Amostra 2: <i>Riser</i> Simulado	38

III.3.3. Amostra 3: <i>Riser</i> Flexível.....	39
III.4. METODOLOGIA	39
III.4.1. Descrição Geral do Arranjo Experimental	39
III.4.2. Sistema de colimação.....	40
III.4.3. Calibração do Sistema.....	43
III.4.4. Procedimento experimental	45
III.4.4.1. Metodologia de inspeção para a Amostra 1: tubo plástico.....	46
III.4.4.2. Metodologia de inspeção para as Amostras 2 (<i>Riser</i> Simulado) e 3 (<i>Riser</i> Flexível)	47
III.4.5. Alteração no arranjo experimental para a Amostra 3: <i>Riser</i> Flexível.....	48
CAPÍTULO IV	51
APRESENTAÇÃO DOS RESULTADOS	51
IV.1. AMOSTRA 1: TUBO PLÁSTICO	52
IV.2. AMOSTRA 2: <i>RISER</i> SIMULADO	57
IV.3. AMOSTRA 3: <i>RISER</i> FLEXÍVEL	66
IV.4. AMOSTRA 3: <i>RISER</i> FLEXÍVEL – APÓS ALTERAÇÃO DO TAMANHO DO VOLUME DE INSPEÇÃO	75
CAPÍTULO V	87
CONSIDERAÇÕES, SUGESTÕES E CONCLUSÃO	87
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	99
ANEXO I	102
ANEXO II	109
APÊNDICE A	112
APÊNDICE B	114

CAPÍTULO I

INTRODUÇÃO

Toda história tem a sua estória.

Carlos Castro

As teorias envolvidas neste trabalho são o efeito fotoelétrico (1905) e o efeito Compton (1923). Vamos escrever uma breve história-estória desses efeitos.

Em 1900 a física parecia ter atingido o seu ponto máximo de compreensão da natureza. As leis de Newton para a mecânica e as equações de Maxwell para o eletromagnetismo consolidavam todo o sucesso da ciência. Diante desse sucesso o físico William Thomson (Lorde Kelvin, 1824 – 1907) afirmou, em uma conferência proferida na Royal Society¹: “Agora não há nada novo por ser descoberto em física. Tudo o que resta são medidas cada vez mais precisas.”

Lorde Kelvin menciona que existiriam apenas “duas pequenas nuvens no horizonte da física”: o resultado negativo da experiência de Michelson-Morley² e o problema da radiação do corpo negro^{3,4}.

O curioso é que justamente dessas duas pequenas nuvens que surgiram duas grandes teorias científicas: a teoria da relatividade e a física quântica.

Em 1900, existia um problema entre teoria e experiência que não se ajustavam, conhecido como catástrofe do ultravioleta. Max Planck (1858 – 1947) em um ato de desespero (palavras suas), cria a hipótese dos “quanta”, ou seja, na natureza, a energia é emitida e absorvida em “pacotes” e não como um fluxo contínuo, como se acreditava⁵.

¹ “Nuvens do século 19 sobre a Teoria Dinâmica do calor e da luz.”

² Era o problema da existência do éter. O éter era tido como o meio material que servia de suporte à propagação das ondas eletromagnéticas.

³ O problema do corpo negro diz respeito à intensidade de radiação emitida por um corpo aquecido.

⁴ Lorde Kelvin poderia ter citado uma outra nuvem. As equações de Maxwell não eram invariante quando se usava a transformada de Galileu.

⁵ A sorte ajuda a quem procura. Planck estava trabalhando com a ideia de um oscilador harmônico. Encontrou uma energia proporcional a sua frequência; dada por: $E = nhf$; $n = 0, 1, 2, \dots$. A energia de um oscilador harmônico quântico é dada por: $E = (n + 1/2) hf$; $n = 0, 1, 2, \dots$.

As reações da comunidade científica, sobre o trabalho de Planck, não despertou interesse por parte da maioria dos físicos e até 1926 sua teoria era considerada um assunto esotérico.

Em 1905, Einstein publicou um artigo com o nome: “Sobre um ponto de vista heurístico a respeito da produção e transformação da luz (Efeito fotoelétrico) ”.

Einstein considerou que a própria energia radiante era quantizada. Diferentemente de Planck que restringiu à quantização da energia para o caso dos osciladores.

O efeito fotoelétrico (sobre os quanta da luz) foi imediatamente rejeitado por quase todos. Millikan (1868 – 1953) passou dez anos tentando provar que Einstein estava errado e em 1916 ele confirmou experimentalmente a equação de Einstein para o efeito fotoelétrico. Alguns anos depois (1923), ao receber o prêmio Nobel de física por seus trabalhos, Millikan comentou:

Depois de dez anos de testes e mudanças e de aprendizado e algumas vezes erros, todos os esforços tendo sido dirigidos desde o início para a medida experimental precisa das energias de emissão dos fotoelétrons, às vezes como função da temperatura, às vezes do comprimento de onda, às vezes do material (relações de força eletromotriz de contato), este trabalho resultou, **contrariamente às minhas próprias expectativas**, na primeira prova experimental direta, em 1914, da validade exata, dentro de estreitos limites de erros experimentais, da equação de Einstein, e da primeira determinação fotoelétrica da constante h de Planck. (JAMMER, 1996 apud MARTINS & ROSA, 2014, p. 118)

Inicialmente, Einstein não usou as ideias de Planck. Em 1907 ele aplicou as ideias de Planck para desenvolver a teoria do calor específico dos sólidos, ou seja, as oscilações térmicas das partículas dos sólidos somente podiam adquirir valores de energia que fossem múltiplos de $E = hf$ ⁶. Uma das consequências da teoria era que, a baixas temperaturas (próximas do zero absoluto), o calor específico de todas as substâncias deverá tender a zero.

Essa energia atende o princípio da incerteza de Heisenberg, que exige uma flutuação mínima para $n = 0$. Planck trabalhava com a diferença de níveis de energia, portanto a constante era subtraída, não alterando os seus resultados.

⁶ Neste trabalho, Einstein levou em conta apenas a quantização da energia de vibração atômica e não a hipóteses dos quanta de luz. Sua publicação teve enorme repercussão positiva.

A hipótese de Einstein (dos quanta) era tão estranha, que Planck jamais aceitou a existência da quantização da radiação⁷. Em 1913, em uma carta em que propunha Einstein como membro da Academia da Prússia, como pesquisador, Max Planck fez a seguinte observação (JAMMER, 1966 apud MARTINS & ROSA, 2014): “Ele pode algumas vezes ter se enganado em relação ao alvo de suas especulações como, por exemplo, na sua hipótese dos quanta de luz, mas isso não pode realmente ser jogado contra ele.”

Atualmente, parece óbvio a concepção dos quanta, entretanto a história da ciência não está desvinculada da história da sociedade. A concepção de onda era uma representação bem sucedida da ciência para explicar os fenômenos da natureza. Onda é uma extensão contínua no espaço e a sua energia é dada pelo quadrado do módulo do campo elétrico. Uma partícula é um ponto bem localizado no espaço e sua energia apresenta-se discretizada. A mudança de paradigma não é fácil e somente diante de evidências e tempo é que o processo vai se instalando. Às vezes é preciso que os velhos morram, para os jovens entrarem em ação.

Cada época e lugar carrega consigo os seus questionamentos. Por que Lorentz ou Poincaré não descobriu a relatividade? É difícil responder, mas⁸...

Em 1905, apoiado nos trabalhos de Lorentz e Poincaré, Einstein publicou o artigo: Sobre a eletrodinâmica dos corpos em movimento⁹.

A elaboração da teoria da relatividade restrita deve-se à tentativa de resolver o problema da não invariância das equações de Maxwell frente às transformadas de Galileu.

Uma das nuvens de Lorde Kelvin (éter) foi relegada para a história da física, limitou a aceleração da segunda lei de Newton, tirou a instantaneidade da terceira lei, tirou o absolutismo do espaço e do tempo da física newtoniana, transformou o espaço e tempo (tridimensional) newtoniano em espaço-tempo (quadrimensional)¹⁰, incorporou

⁷ A questão principal era conciliar os quanta de luz com fenômenos de interferência.

⁸ “Talentoso é aquele que acerta um alvo que ninguém está conseguindo. Gênio é aquele que acerta um alvo que ninguém está vendo.”

⁹ Teoria da relatividade restrita.

¹⁰ Essa formulação foi feita por Minkowski (1864 – 1909) em 1908. O espaço-tempo não depende de nenhuma escolha de referencial. Para um intervalo de tempo e espaço iguais podemos escrever: $x^2 + y^2 + z^2 = c^2 t^2$. Assim, $c t$ tem unidade de comprimento.

a mecânica newtoniana, para baixas velocidades, em sua teoria e também, em 1905, deduziu a equação $E = mc^2$, que representa a equivalência entre massa e energia.

O interessante na teoria da relatividade restrita, é que ela elimina absolutos e baseia-se em um absolutismo válido para todo o Universo conhecido. A velocidade da luz é constante para todos os referenciais, portanto não depende do movimento da fonte. Ou seja, qualquer mediação feita entre corpos ou partículas se processa no máximo com a velocidade da luz no vácuo.¹¹

A teoria da relatividade restrita não era compatível com a teoria da gravidade de Newton. Partindo do princípio de equivalência entre a massa inercial e a massa gravitacional, Einstein publica em 1916 a Teoria Geral da Gravidade. Retira a ideia de força da gravidade e diz: “a massa-energia age sobre o espaço-tempo, tornando-o curvo. O espaço-tempo age sobre a massa, encurvando seus movimentos.” Assim, os planetas não giram em torno do Sol por causa de uma força, mas porque esta é a trajetória determinada pela geometria do espaço-tempo.

No meio dessa breve história-estória, ou seja, entre 1905 (efeito fotoelétrico) e 1923 (efeito Compton), aparece um jovem, que vai tentar ajustar o problema dos quanta de Einstein, com a teoria ondulatória das radiações. Alguns fenômenos físicos podiam ser explicados pelo aspecto ondulatório e outros pelo aspecto de quanta das radiações.

Louis de Broglie se formou em 1910, aos dezoito anos de idade, em letras, com um trabalho sobre a história da Idade Média. Seu irmão Maurice era formado em física e era 18 anos mais velho do que Louis. Sua família era rica, e eles nunca tiveram que se preocupar com problemas financeiros¹².

¹¹ Para a física clássica a realidade é local (ou localidade), significando que uma medida realizada em uma partícula, só poderá afetar uma outra que esteja distante, com velocidade inferior ou igual a velocidade da luz. Na física quântica duas partículas EMARANHADAS, quando uma medida é feita em uma partícula, afeta a outra instantaneamente, independente da distância entre elas. Isso é conhecido como realidade não-local (ou não-localidade). Einstein denominou o emaranhamento quântico de “Fantasmagórica ação a distância”. Se Einstein estivesse vivo teria que enfrentar as considerações de Bell: Qualquer que seja a realidade, ela precisa ser não-local; e nenhuma realidade local pode explicar o tipo de mundo em que vivemos. O emaranhamento foi verificado experimentalmente pelo físico francês Alain Aspect na Universidade de Paris em 1982. Alguns cientistas estão discordando da precisão das medidas de Aspect.

¹² Maurice nunca teve uma posição acadêmica, mantendo-se sempre independente e custeando suas próprias pesquisas (e a de seus colaboradores). No entanto, seu laboratório adquiriu grande importância e ajudou a formar uma escola de pesquisadores. Maurice e Paul Langevin trabalhavam juntos e tiveram grande influência sobre Louis.

De Broglie estava procurando uma massa de repouso (m_0) para os quanta. Para isso igualou as equações $E = hf$ e $E = mc^2$, então: $m_0c^2 = hf_0$ onde f_0 é a frequência de repouso¹³.

No início da década de 1920, o espalhamento de raios x pela matéria era explicado pela teoria clássica de J. J. Thomson. As experiências se confirmavam para raios x de baixa energias. Para raios x mais energéticos surgiam efeitos diferentes em relação à distribuição angular da radiação.

Em 1921, Compton estudando o comprimento de onda da radiação espalhada, verificou que sempre havia um aumento desse comprimento de onda. Isso era incompatível com a teoria de J. J. Thomson, que afirmava que a radiação espalhada deveria ter o mesmo comprimento de onda da radiação incidente.

Durante anos Compton tentou explicar a variação observada do comprimento de onda dos raios x espalhados pela matéria, utilizando a teoria ondulatória. Somente no final de 1921 ele começou a explorar a hipótese dos quanta. Em 1922 ele passou a tratar o fenômeno como um tipo de colisão elástica, levando em conta a energia e o momentum do quantum de radiação. Usou a dinâmica relativística para desenvolver o momentum e a energia do elétron.

Arthur H. Compton (1892 – 1962) publicou o seu trabalho em 1923 e se expressou assim:

De acordo com a teoria clássica, cada raio x afeta todos os elétrons na matéria atravessada, e o espalhamento observado é devido aos efeitos combinados de todos os elétrons. Do ponto de vista da teoria quântica, podemos supor que qualquer quantum particular de raio x não é espalhado por todos os elétrons do irradiador, mas gasta toda sua energia sobre algum elétron particular. Este elétron, por sua vez, desviará o raio em alguma direção definida, em um certo ângulo com o feixe incidente. Este desvio da trajetória do quantum de radiação resulta em uma mudança de seu momentum. Como consequência, o elétron desviador recuará com um momentum igual à mudança de momentum do raio x. A energia do raio desviado será igual à do raio x incidente menos a energia cinética de recuo do elétron espalhador. E como o raio desviado deve ser um quantum completo, a frequência será reduzida na mesma razão que sua energia. Assim, na teoria quântica, deveríamos esperar que o comprimento de onda dos raios x espalhados seja maior do que o dos raios incidentes. (COMPTON, 1923 apud MARTINS & ROSA, 2014, p. 129)

¹³ De Broglie sempre evitava contrariar a velocidade da luz. Ele chegou a essa fórmula:

$v = c - \frac{c^3 m_0^2}{2h^2 f^2}$. Estabeleceu um limite para $m_0 < 10^{-50}$ g e posteriormente para 10^{-48} g. Esse trabalho não foi aceito na época e nem posteriormente.

O trabalho de Compton representa uma importante confirmação da hipótese do quantum de radiação de Einstein, entretanto Compton não cita Einstein em seu trabalho. Assim, a hipótese da quantização da radiação passou a ser levada mais a sério.

Sommerfeld (1868 – 1951) interpretou o resultado de Compton expressando-se assim: “A teoria ondulatória dos raios x teria que ser abandonada.” Posteriormente, se expressou assim: “No momento temos que admitir que a teoria ondulatória é indispensável; por outro lado, estamos seguros de que a estrutura quântica também é indispensável. Nesse assunto, a física moderna está diante de contradições irreconciliáveis.” (MEHRA & RECHENBERG, 1982 apud MARTINS & ROSA, 2014)

Niels Bohr (1885 – 1962) reagiu negativamente expressando-se desta forma: “A interpretação do efeito Compton através dos quanta de radiação era um dos maiores perigos para o futuro da teoria quântica.” (MARTINS & ROSA, 2014)

A descoberta do efeito Compton adicionou mais um problema, em vez de proporcionar uma solução ao conflito. Os cientistas teriam que conviver com a dualidade da radiação.

E o jovem De Broglie. Será que ele conseguiu explicar a dualidade da radiação?

Em 1924 ele apresentou a sua tese de doutorado. Einstein se expressou dessa forma: “O trabalho de De Broglie causou-me grande impressão. Ele levantou a ponta do grande véu.” Erwin Schrödinger assim: “Isto é um lixo.” (MARTINS & ROSA, 2014)

De Broglie escreveu na sua tese que...

Infelizmente a nossa breve história-estória do efeito fotoelétrico e Compton, tem que terminar com uma reticência.

Para um observador ingênuo o conhecimento sobre a produção de petróleo em especial no Brasil, está atrelado ao valor monetário que se cobra nas bombas de gasolina diariamente. Mas se “cavarmos” um pouco mais profundo surgirão nuances de um passado não tão distante, mas que conta a história-estória dessa nossa história.

Dois fatos marcaram o ano de 1939. O primeiro a nível mundial quando da invasão do exército alemão à Polônia, desencadeando a Segunda Guerra Mundial. E numa escala nacional o Jornal do Brasil, datado de 25 de janeiro, revelava a notícia: O Petróleo em Lobato, no Estado da Bahia. Neste período o petróleo ainda era considerado dispensável, o mundo se recuperava de uma crise econômica oriunda de 1929 e o Brasil engatinhava no setor industrial, mesmo com incentivo do então Presidente Getúlio

Vargas. Um ano antes, em 1938, foi criado o Conselho Nacional de Petróleo (CNP) sendo considerado a primeira iniciativa para estruturar e regulamentar a exploração de petróleo no Brasil. Em 1941 é criada a Companhia Siderúrgica Nacional e em 1943 a mineradora Vale do Rio Doce. Com o término da Segunda Guerra Mundial o petróleo passa ser considerado tão importante quanto o aço. Companhias americanas controlavam a produção e a distribuição do petróleo brasileiro, gerando desconforto aos nacionalistas. Foi então que a campanha 'O Petróleo é nosso', liderada pelo general Horta Barbosa, ganhou fôlego. Nesse contexto polêmico, em 3 de outubro de 1953, foi fundada a Petróleo Brasileiro S.A. (Petrobrás), que instituiu o monopólio estatal da exploração, do refino e do transporte de petróleo.

A Petrobrás começou a operar, de fato, em maio de 1954 produzindo mais de 2 mil barris de petróleo por dia. Seu patrimônio inicial foi herdado do CNP e consistia das refinarias de Mataripe, na Bahia e a de Cubatão, em São Paulo. No fim dos anos 1950 e 1960 a empresa começa a ter ações negociadas em bolsa, descobre petróleo na Bacia de Santos e constrói (a primeira construída pela empresa) a Refinaria Duque de Caxias (Reduc). A Reduc proporcionou ao Brasil autossuficiência para alguns derivados do petróleo e provocou uma mudança no perfil das importações, que passaram a se concentrar em petróleo bruto. A Petrobrás passou por um período de intensa evolução tecnológica e descoberta de novas bacias, sobreviveu às crises do petróleo vivenciadas por todo o mundo. E em 1980 foi a primeira empresa do mundo a produzir petróleo em águas abaixo de 500 metros (Bacia de Campos) e em 1984 alcançara a meta de 500 mil barris diários de petróleo. (PETROBRÁS, 2014)

Em 1997 termina o monopólio do petróleo. A Petrobrás, que era 100% estatal, passa a atuar, também, no mercado privado e competitivo, chegando a produzir cerca de um milhão de barris diários de petróleo. A partir de então foi necessário a criação de um órgão que se responsabilizasse pela realização de leilões de concessões de áreas de petróleo - a Agência Nacional do Petróleo (ANP). Os anos de 2000 e 2001 foram marcados por acidentes, entre eles vazamento de 1,3 milhões de litros de petróleo na Baía de Guanabara e explosões na P-36 (Bacia de Campos) causando a morte de 11 funcionários da empresa. (PETROBRÁS, 2014)

Em 2006 o Brasil anuncia grandes e promissoras reservas de pré-sal (5000 e 7000 metros de profundidade, sendo 2000 apenas de sal), nos campos de Tupi e Libra, entre outros. O regime exploratório para o pré-sal passa a ser o de partilha, em que a União é sócia das empresas no campo. Em 2008 foi iniciada a produção do primeiro poço no pré-sal no campo Jubarte, na Bacia de Campos. Sete anos após a primeira descoberta

de petróleo na camada pré-sal, em 2013, a produção alcança 300 mil barris por dia. Atualmente, a Petrobrás produz 2 milhões 539 mil barris de óleo equivalente por dia e o Plano Estratégico Petrobrás 2030 pretende aumentar este valor para 4 milhões de barris de óleo por dia (bdp). (PETROBRÁS, 2014)

A produção de petróleo no Brasil construiu uma sólida estrutura ao longo de anos. Muitos foram os desafios para chegarmos ao nível de excelência. Reconhecida internacionalmente e atuante em 24 países, além do Brasil, a Petrobrás tem uma participação cada vez maior no setor energético mundial. Em 2004 foi lançada a Política Industrial, Tecnológica e de Comércio Exterior (PITCE) – política focada no aumento da eficiência da estrutura produtiva, aumento da capacidade de inovação e na expansão das exportações por parte das empresas brasileiras. Assim deve-se priorizar a melhoria da utilização dos recursos da infraestrutura empresarial evitando que a desvalorização estrutural seja responsável pela perda de foco da empresa, bem como a falta de confiabilidade operacional.

Para dimensionar a complexidade na exploração e produção de óleo e gás, em água profundas e ultraprofundas, é preciso pensar em altos investimentos em pesquisas e tecnologias. Componentes indispensáveis neste processo são os dutos suspensos em plataformas flutuantes, conhecidos como *risers* (anexos I e II). Os *risers* compõem sistemas de escoamento de hidrocarbonetos para a superfície. Perdas de produção em função de falhas de componentes e estruturas mecânicas são frequentes uma vez que esses tubos são considerados os pontos críticos do sistema. Tais falhas provocam, dentre outros, perdas humanas, mecânicas, desastres ambientais e paradas inesperadas.

Neste sentido, a motivação para a realização deste trabalho está baseada na necessidade de desenvolvimento de sistemas mais eficientes de inspeção e manutenção de *risers* flexíveis, uma vez que, os procedimentos atuais envolvem apenas monitoramento visual da capa externa e da pressão de gás no anular do tubo. Esses procedimentos são incapazes de prevenir falhas catastróficas, pois apresentam resultados imprecisos e muitas vezes tardios. O nosso estudo apresenta uma técnica de inspeção em potencial que poderá ajudar no desenvolvimento econômico e tecnológico da indústria moderna do petróleo.

A técnica de inspecionar a superfície ou interior de um corpo sem causar prejuízo ou alterações em sua composição é conhecida como Ensaio Não Destrutivo (END). Inicialmente a aplicabilidade dessas técnicas restringia-se à medicina. Com a expansão industrial e o aumento no número de projetos e produtos de forma multinacional, surgiu

a necessidade de garantir a qualidade dos produtos fabricados como, por exemplo, a isenção de defeitos. Atualmente a adaptação dessas técnicas a procedimentos industriais está totalmente estabelecida.

A técnica de espalhamento Compton vem apresentando resultados significativos no tocante a inspeção de corpos de prova que não permitem a utilização da técnica de transmissão por serem maciços ou possuir uma localização onde apenas uma de suas faces esteja acessível. A técnica apresenta-se promissora em diversas aplicações como podemos observar a seguir.

SILVA et al (1999) utilizaram a técnica de espalhamento Compton para detectar defeitos superficiais em objetos de forma tubular. O estudo foi realizado utilizando um sistema com uma fonte de ^{137}Cs , com atividade de 74 GBq (2 Ci) e um detector cilíndrico de NaI(Tl) posicionado de tal forma a obter um ângulo de espalhamento de 180° . O espectro de altura de pulso da radiação espalhada foi utilizado, no primeiro instante, para analisar a espessura de objetos já conhecidos. A partir da calibração obtida, foi possível determinar a espessura, com uma precisão de 4%, para os objetos de teste dentro dos limites aceitáveis e de 6% para valores que excedam estes limites. Posteriormente a calibração foi utilizada para analisar defeitos de superfície. A técnica permitiu detectar 2 mm de corrosão em um tubo de 77,3 mm de diâmetro com uma parede de espessura de 6,3 mm.

CESAREO et al (2001) projetaram e construíram um aparelho para medição e aquisição de imagens de objetos utilizando raios x espalhados. Este é composto por um feixe de fótons bem colimado a partir de um tubo de raios x e um detector semicondutor CZT resfriado termoeletricamente. Foram realizados estudos sobre espalhamento Compton e Rayleigh, incluindo o perfil de Compton. Este estudo possibilitou a obtenção de imagens a partir do espalhamento Compton.

OLIVEIRA (2009) realizou, em sua dissertação de mestrado, um estudo de viabilidade de um sistema de inspeção para dutos compósitos por retroespalhamento Compton da radiação tendo como objetivo a detecção de defeitos nas junções das superfícies destes dutos, que são coladas com resina epóxi. Foram obtidos espectros de energias de pontos diferentes nas peças e posteriormente analisados os defeitos causados por falta de adesão e falta de aderência. Os experimentos mostraram a viabilidade da técnica para a inspeção de juntas coladas de dutos compósitos com resina epóxi.

HARDING & HARDING (2010) discutiram e revisaram os princípios da realização de uma técnica, denominada *Compton Scatter Imaging (CSI)* - Imagem por

Espalhamento Compton – a qual é baseada na detecção espacialmente resolvida do espalhamento Compton de raios X. O foco aplicacional desta revisão corresponde a objetos de interesse histórico. O retroespalhamento de raios X permitem que objetos maciços sejam inspecionados em substituição a uma técnica convencional que se utiliza da transmissão para se obter uma imagem, onde os raios X são demasiadamente absorvidos. Este estudo apresentou imagens de uma múmia egípcia e um fecho medieval, adquiridos a partir do ComScan (Acrônimo para Scanner de Espalhamento Compton) onde sua utilização na análise histórica é essencial.

SHARMA et al (2010) apresentaram um sistema de scanner que opera de forma não-destrutiva e não-invasiva para determinar a localização de gasoduto no solo terrestre, bem como sua parede, tipo de fluxo e posição de crack / bloqueio líquido. O experimento simulou um caso real onde a corrosão do tubo (afinamento da parede) pôde ser reconhecida a partir do estudo do espalhamento incoerente de fótons gama de 662 keV. A intensidade do espalhamento incoerente, obtido por desdobramento (desconvolução) da distribuição experimental de altura de pulso no detector cintilador de NaI(Tl), com a ajuda da matriz de resposta inversa, fornece a informação desejada. O método é bastante sensível para pequenas alterações (~ 1 mm) na espessura da parede do tubo, a localização de um defeito de 1 milímetro de largura sob o isolamento e uma pequena variação (- 0,1 g.cm⁻³) na densidade do líquido que flui através do tubo.

Foram medidas por SINGH (2010) as seções transversais de espalhamento Rayleigh e Compton para fótons de 19,648 keV em alguns elementos com $6 \leq Z \leq 50$. Estas medidas foram realizadas sob vácuo (~ 10⁻² Torr) em um ângulo de espalhamento de 141°. Foi medido seções transversais para o espalhamento Rayleigh comparados com os fatores de forma modificados (MFs), as MFs corrigidos para os fatores de dispersão anômala (ASFS), ou seja, MFASFs e os cálculos matriz-S. As seções transversais do espalhamento Compton medido foram comparadas com as seções transversais teóricas Klein-Nishina corrigidos para a função não-relativista Hartree-Fock de espalhamento incoerente $S(x, Z)$. A técnica demonstrou que as medidas das seções transversais de espalhamento Rayleigh em baixas energias são significativas o suficiente até mesmo para os elementos de baixo Z. Nas medidas de espalhamento Compton, o ISF e outros resultados previstos concordam bem com as energias de fótons mais altos, mas eles diferem em energias abaixo de 20 keV.

Estruturas de concreto armado exigem monitorização frequente para garantir a qualidade do concreto durante a sua vida útil e para a avaliação de condições in situ existentes. BOLDO & APPOLONI (2014) utilizaram a técnica de retroespalhamento

Compton para caracterizar e detectar defeitos em materiais e inclusões em concreto armado. O conceito baseia-se na detecção da radiação gama retroespalhada produzida a partir de um feixe colimado direcionado para a amostra. Através da medição do espectro de espalhamento foi possível determinar perturbações de densidade locais. As amostras foram irradiadas com raios gama de uma fonte colimada de ^{241}Am (100 mCi) e os fótons espalhados inelasticamente foram registados a um ângulo de 135° por um detector semicondutor CdTe de alta resolução. A digitalização foi conseguida pelo movimento lateral dos blocos de amostras em todo o campo da fonte e do detector em passos de 1 mm. Os resultados mostraram que é possível localizar inclusões e defeitos com 8 mm posicionado a uma profundidade de 20 mm abaixo da superfície da amostra.

O objetivo dessa dissertação é buscar uma metodologia para identificar alagamentos em tubos *risers* e responder a seguinte pergunta: É possível, através do espalhamento Compton, diferenciar o espectro de um tubo *riser* com ar de um com água?

Para obter a resposta procedeu-se da seguinte maneira: Capítulo II: Considerações teóricas; Capítulo III: Materiais e métodos; Capítulo IV: Apresentação dos resultados e Capítulo V: Considerações, sugestões e conclusão.

CAPÍTULO II

CONSIDERAÇÕES TEÓRICAS

“A natureza está escrita em um imenso livro aberto diante de nossos olhos e esse livro está escrito em linguagem matemática”.

Galileu Galilei

A representação teórica que os cientistas fazem da natureza, pode não ser a representação real da sua essência. A tradução do livro pode não ser perfeita, mas é uma tradução do livro, pois nenhuma tecnologia teria sido criada com uma tradução totalmente incorreta.

As teorias envolvidas, neste trabalho, estão bem estabelecidas e documentadas em livros¹⁴. Portanto, vamos nos deter somente nos aspectos essenciais básicos para a sua compreensão.

II.1. Produção de raios X

A descoberta dos raios X foi feita por Röntgen¹⁵ em 1895, mas a sua natureza de onda eletromagnética ficou consolidada, somente em 1912, por Laue¹⁶.

¹⁴ Estamos fortemente influenciados pelas leituras dos livros: *Introduction to Radiological Physics and Radiation Dosimetry* de Frank Herbert Attix; *Física das Radiações* de Emico Okuno e Elisabeth Yoshimura e também pela dissertação de Mestrado: *Estudo da Técnica de Retroespalhamento de raios X e gama na Inspeção de Dutos Compósitos* de Cristyane Silva Santos de Oliveira.

¹⁵ Wilhelm Conrad Röntgen (1845 – 1923). Recebeu o primeiro Nobel de Física em 1901, pela descoberta dos raios X.

¹⁶ Max von Laue (1879 – 1960). Concebeu a ideia de usar um cristal como rede de difração em experimentos de difração de raios X.

Os processos fundamentais envolvidos na produção de raios X são dois: Raios X de freamento (espectro contínuo de energia) e raios X característicos ou de fluorescência (espectro de linhas ou de raios, com energias bem definidas).

II.1.1 Radiação de freamento

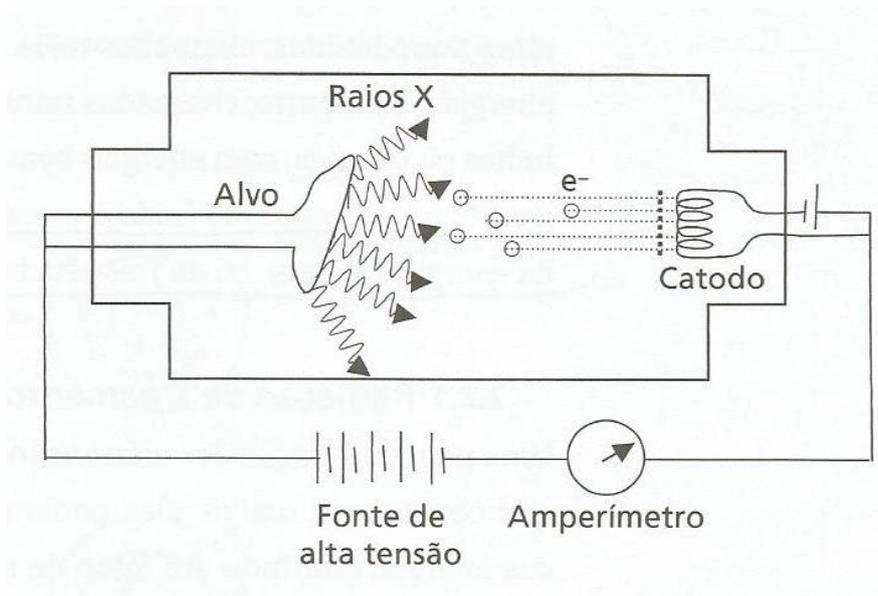


Figura II.1 – Diagrama simplificado de um tubo de raios X (OKUNO, 2010).

Uma pequena fração dos elétrons incidentes no alvo (ver figura II.1) aproxima-se dos núcleos dos átomos que constituem o alvo. Eles podem perder uma fração considerável de energia, emitindo um fóton de raios X. De outra forma: Um fóton de raios X é criado quando o elétron sofre uma desaceleração brusca devido à atração causada pelo campo coulombiano do núcleo. Os raios X assim gerados são chamados de radiação de freamento (tradução da palavra alemã BREMSSTRAHLUNG) e podem ter qualquer energia, que depende do grau de aproximação do elétron do núcleo e da energia cinética do elétron, portanto o seu espectro é contínuo. (OKUNO, 2010) A figura II.2 exemplifica esse processo.

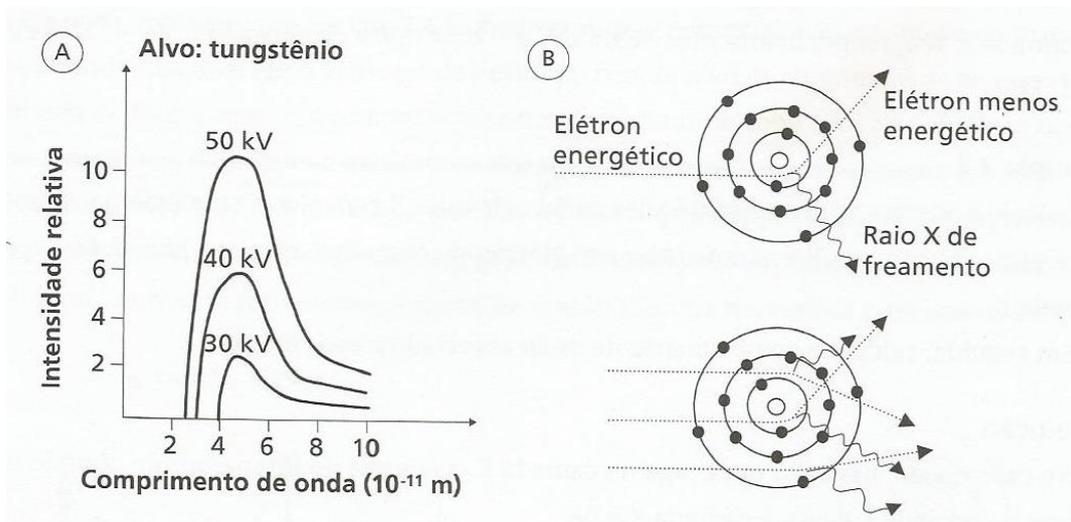


Figura II.2 – (A) Espectro contínuo de raios X emitidos de um tubo com alvo de W, para três valores de potencial acelerador (B) Processo de geração de um fóton de raio X de freamento. (OKUNO, 2010)

II.1.1.1. Cálculo do comprimento de onda mínimo (λ_{min}) do raio X emitido (energia máxima).

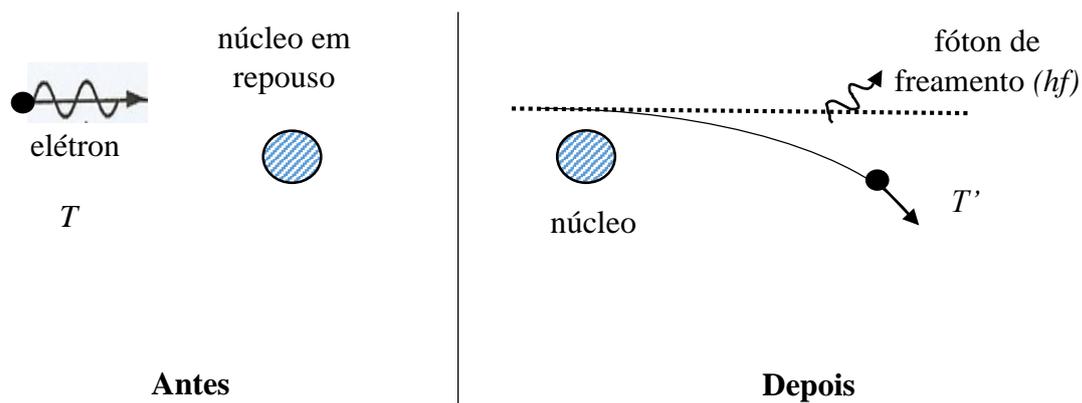


Figura II.3 – Esquema ilustrando a produção de raios X de freamento.

T = Energia cinética do elétron antes da interação.

T' = Energia cinética do elétron depois da interação.

$hf = \frac{hc}{\lambda}$ = Energia do fóton emitido, onde h é a constante de Planck, c é a velocidade da luz no vácuo e λ é o comprimento de onda do fóton emitido.

Para um sistema de referência colocado no alvo (anodo), podemos aplicar o princípio de conservação da energia.

A energia potencial elétrica no alvo é igual a zero e a energia cinética será máxima. A energia potencial elétrica no catodo será máxima e a cinética será zero. Assim; temos:
 $T = E_p \Rightarrow T = qV \Rightarrow T = eV$, onde e é a carga do elétron e V é a diferença de potencial aplicada entre o catodo e o anodo.

Aplicando o princípio da conservação da energia; obtemos:

$$T = \frac{hc}{\lambda} + T' \Rightarrow \frac{hc}{\lambda} = T - T' \quad (\text{II.1})$$

Quando toda a energia cinética do elétron T é usada para produzir um fóton de raios X; temos: $T' = 0$; então:

$$\frac{hc}{\lambda_{min}} = T = eV \Rightarrow \lambda_{min} = \frac{hc}{eV} \quad (\text{II.2})$$

Assim: A energia máxima $E_{máx}$ do fóton emitido independe do material de que é feito o alvo; e depende somente da diferença de potencial V aplicada ao tubo de raios X.

A figura II.2 mostra que:

Quanto maior a voltagem V , maior a eficiência na produção de raios X, e que o valor de λ_{min} é inversamente proporcional a V .

II.1.2 Raios X característicos

Diferentemente dos fótons de freamento, que independem do material de que é feito o alvo e podem ter qualquer energia com limite no valor máximo, os raios X característicos mostram uma assinatura do material e têm o espectro discreto¹⁷.

Um fóton de energia na faixa de raio X é emitido quando as transições do elétron envolvem camadas mais internas do átomo.

Quando um elétron incidente no alvo remove um elétron da camada K, cria-se um buraco em seu lugar, que é imediatamente preenchido pela transição de um elétron da camada mais externa. Para arrancar um elétron da camada K de um átomo, o elétron incidente deve ter, no mínimo, a energia de ligação do elétron nessa camada. Na transição de um elétron da camada L para a K, por exemplo, o excesso de energia é liberado sob a forma de um fóton, cuja energia corresponde à diferença entre E_L e E_K , que representam as energias totais dos elétrons nas camadas L e K respectivamente: $E(\text{fóton}) = E_L - E_K$. (OKUNO, 2010)

A figura II.4 mostra o espectro de comprimentos de onda de raios X produzidos em um tubo com alvo de tungstênio (W) e de molibdênio (Mo), quando se aplica um potencial acelerador de 35 kV. Nota-se que o espectro com alvo de Mo é a soma do espectro contínuo de freamento mais o de linha dos raios X característicos, K_α e K_β ¹⁸.

A quantidade total de fótons de raio X característico cresce com a energia do elétron logo acima da energia de ligação, mas se estabiliza para energias cinéticas mais elevadas (ATTIX, 1986).

¹⁷ Charles Grover Barkla (1877 – 1944). Descobriu os raios X característicos.

¹⁸ O espectro com o alvo de W só contém radiação de freamento, pois a energia do elétron de 35 keV incidente no alvo não é suficiente para arrancar um elétron da camada K.

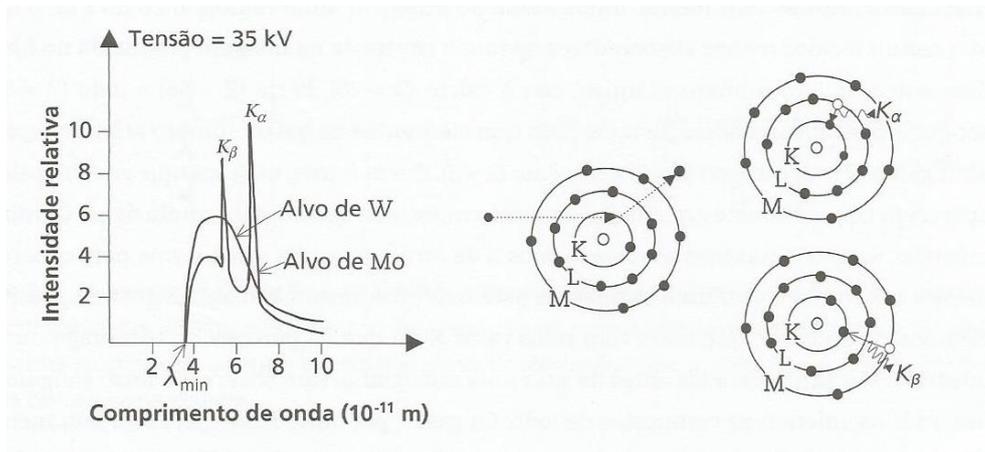


Figura II.4 – Espectro de raios X emitidos por um tubo com alvo de Mo e de W. Para uma diferença de potencial de 35 kV. A figura à direita mostra a ejeção de um elétron por um elétron incidente no alvo e a posterior emissão de um fóton de raio X característico K_{α} ou K_{β} (OKUNO, 2010).

As transições de elétrons de níveis mais externos para o nível $n = 1$ (camada K) é denominada série K. A transição de $n = 2$ para $n = 1$ denomina-se K_{α} . De $n = 3$ para $n = 1$, K_{β} . De $n = 4$ para $n = 1$: K_{γ} , e assim sucessivamente. Quando as transições eletrônicas tem como destino o nível $n = 2$ (camada L), denominamos série L. De $n = 3$ para $n = 2$: L_{α} . De $n = 4$ para $n = 2$: L_{β} , e assim sucessivamente. Na Figura II.5 temos as três primeiras séries de raios X.

Analisando melhor a estrutura do átomo percebemos porque o espectro de raios X característico mostra uma notável regularidade de um elemento para outro. Os elétrons na camada K ($n = 1$), que estão mais próximos ao núcleo funcionam como sondas da sua carga. Como cada elemento tem um núcleo diferente, eles também emitem raios X característicos diferentes. (PERUZZO et al, 2013)

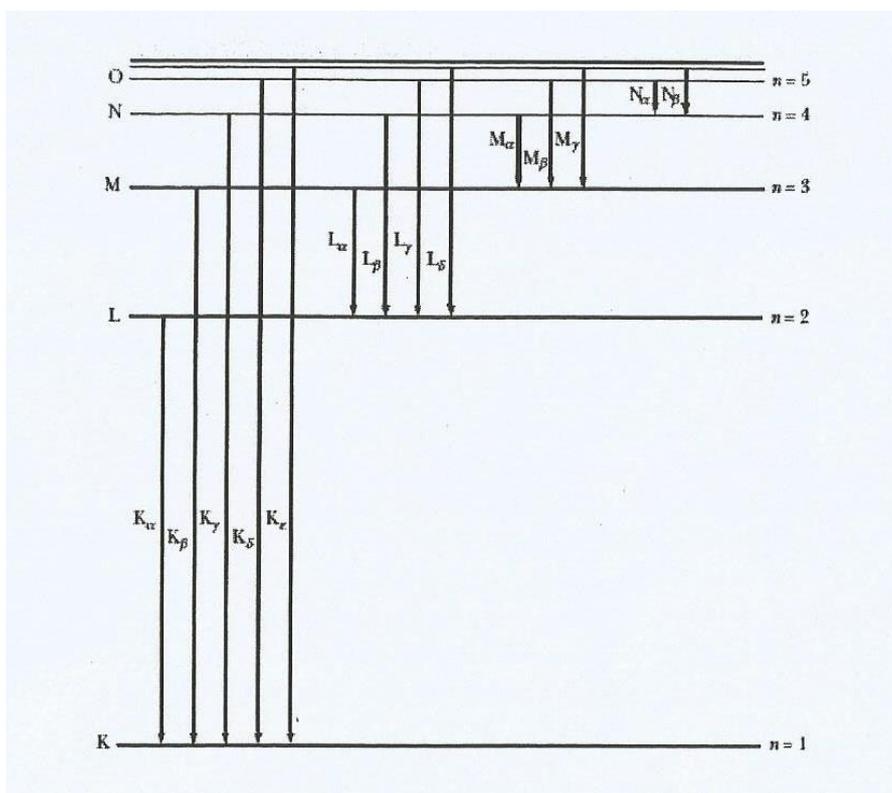


Figura II.5 – As primeiras séries de raios X. (PERUZZO et al, 2013).

II.1.3 Atenuação dos raios X

As características dos raios X são expressas em função da quantidade e qualidade do feixe. A quantidade refere-se ao número de fótons de um feixe e a qualidade, à energia dos fótons. A intensidade depende tanto da qualidade quanto da quantidade dos fótons.

A atenuação é a redução da intensidade do feixe de raios X, quando estes atravessam um dado meio, e deve-se ao espalhamento e à absorção que resulta da interação dos fótons¹⁹ com os átomos do meio. (OKUNO, 2010)

¹⁹ Principalmente as interações fotoelétrica e Compton, para o caso em estudo.

II.1.3.1 Atenuação de um feixe de radiação monoenergética

Este tipo de atenuação refere-se somente à diminuição do número de fótons e, portanto, estamos tratando o feixe só em termos de quantidade. A atenuação obedece à lei exponencial:

$$I = I_0 e^{-\mu x} \quad (\text{II.3})$$

onde I_0 e I são a intensidade do feixe antes e depois de atravessar um material com espessura x , e é a base dos logaritmos neperianos e μ é o coeficiente de atenuação linear do meio, que depende do material que constitui o meio e da energia da radiação. A figura II.6 (A) esquematiza o texto acima. (OKUNO, 2010)

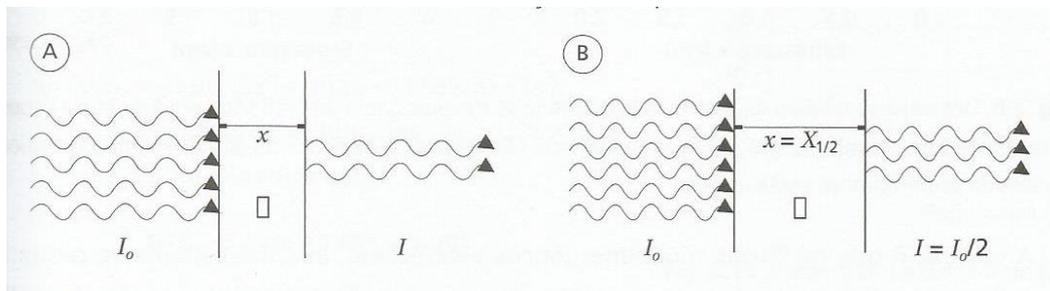


Figura II.6 – (A) Atenuação de um feixe de radiação monoenergético ao atravessar um meio de espessura x com coeficiente de atenuação linear μ ; (B) Atenuação da intensidade da radiação à metade do valor incidente ao atravessar um material com coeficiente de atenuação linear μ , com espessura equivalente a uma camada semi-redutora. (OKUNO, 2010).

Da equação II.3 podemos calcular a espessura $x = X_{1/2}$ de um material que reduz a intensidade da radiação à metade (figura II.6 (B)). Assim, para $I = I_0/2$; temos:

$$X_{1/2} = \frac{0,693}{\mu} \quad (\text{II.4})$$

onde $X_{1/2}$ é a camada semi-redutora (CSR). Materiais que blindam bem fótons têm alto valor de coeficiente de atenuação linear μ , e como ele é inversamente proporcional à CRS, esta é pequena.

A cada CSR que os fótons (monoenergéticos) atravessam, sua intensidade se reduz à metade. Assim, após a primeira CSR, $I = I_0/2$; após a segunda, $I = I_0/4$; após a terceira, $I = I_0/8$ e assim por diante. Isso pode ser verificado, substituindo $\mu = \frac{\ln 2}{X_{1/2}}$ na equação II.4.

$$I = \frac{I_0}{e^{\mu x}} = \frac{I_0}{e^{\frac{(\ln 2)x}{X_{1/2}}}} = \frac{I_0}{2^{x/X_{1/2}}} \quad (\text{II.5})$$

Em vez de usarmos o coeficiente de atenuação linear μ em cm^{-1} na equação II.5 (que depende da densidade ρ (g/cm^3) do material), podemos usar o coeficiente de atenuação mássico (de massa), que é μ/ρ , medido em cm^2/g , para ficar independente do estado físico. A tabela II.1 exemplifica o texto acima.

Tabela II.1 (OKUNO, 2010) – Densidade (em g/cm^3), coeficiente de atenuação linear (em cm^{-1}) e coeficiente de atenuação mássico (em cm^2/g) da água (estado líquido), do gelo (estado sólido) e do vapor d'água (estado gasoso) para fótons com energia de 50 keV)

Características			
Estado físico	ρ (g/cm^3)	μ (cm^{-1})	μ/ρ (cm^2/g)
Água	1,000	0,214	0,226
Gelo	0,917	0,196	0,226
Vapor d'água	$5,98 \times 10^{-4}$	$1,28 \times 10^{-4}$	0,226

II.1.3.2 Atenuação de um feixe de radiação polienergética

Em um feixe policromático, a segunda CSR não coincide com a primeira, porque a atenuação em um dado meio depende da energia dos fótons. O espectro do feixe policromático que atravessa a primeira CSR tem energia média maior do que o espectro do feixe original. (OKUNO, 2010)

Com a obtenção experimental de um espectro contínuo de raios X, é possível determinar a energia média do feixe. Uma técnica para obter os espectros é a simulação computacional, usando-se o método de Monte Carlo.

Uma completa especificação da qualidade de um feixe de raios X requer a medida de vários parâmetros, sendo um deles a determinação da CSR de materiais padrão, como o alumínio ou o cobre, para um dado feixe. Dependendo dos propósitos, a especificação da qualidade em função da CSR já é suficiente. Conhecida a CSR, é possível conhecer a energia efetiva do feixe por meio da correlação entre essas duas grandezas. Assim, a energia efetiva de um feixe com espectro contínuo equivale à energia de um feixe monoenergético que tem igual valor de CSR.

Convencionou-se utilizar, para a medida da CSR e a determinação da energia efetiva, as grandezas exposição e kerma. Portanto, para um feixe policromático, define-se a CSR como a quantidade de material que reduz a exposição²⁰ (ou o kerma²¹) à metade do valor inicial.

²⁰ A exposição é definida somente para raios X e gama e é dada por: $X = dQ/dm$, onde dQ é o valor absoluto da carga total de íons de um dado sinal, produzidos no ar, quando todos os elétrons (negativos e positivos) liberados pelos fótons no ar em uma massa dm , são completamente freados no ar. (unidade: C/Kg de ar).

²¹ Kerma é uma grandeza com a mesma unidade que a dose absorvida (gray) e é dado por: $k = \frac{dE_{tr}}{dm}$, onde dE_{tr} é a energia transferida ao meio e representa a soma das energias cinéticas iniciais de todas as partículas carregadas liberadas pelas partículas sem carga, em elemento de volume de massa m . O kerma ocorre no ponto de interação do fóton e a dose absorvida ocorre ao longo da trajetória do elétron.

II.2 Efeito Fotoelétrico

Em 1905, Albert Einstein, publicou na revista *Annalen der Physik* o artigo intitulado: *Sobre um ponto de vista heurístico a respeito da produção e transformação da luz*, onde ele apresenta a sua hipótese dos quanta de luz²². Ele postulou que a energia de um quantum de luz é diretamente proporcional à sua frequência. Assim, cada quantum possui uma energia igual a: $E = hf$ onde h é a constante de Planck e f é a frequência da radiação eletromagnética.

O efeito fotoelétrico é caracterizado pela transferência total da energia da radiação X ou γ a um único elétron orbital, que é expelido com uma energia cinética T bem definida. A figura II.7 representa esta situação para um átomo com energia cinética de recuo zero ($T_a = 0$).

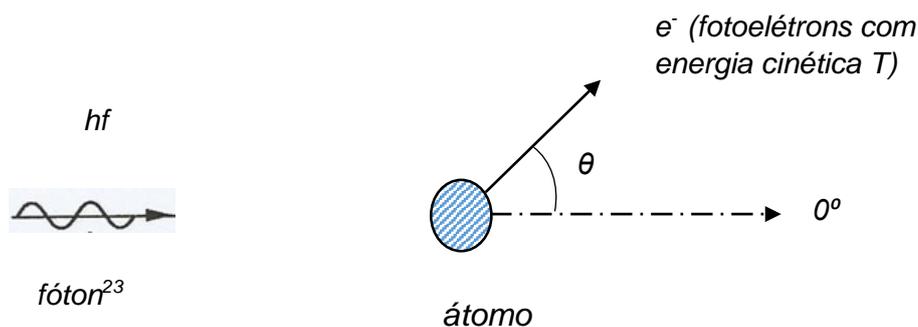


Figura II.7 – Esquema representando um átomo com energia cinética de recuo zero.

²² O ponto de partida de Einstein não foi o mesmo que o de Planck. Em sua demonstração Planck se restringiu à quantização da energia para o caso de osciladores. O trabalho de Einstein foi mais revolucionário, ele quantizou a radiação eletromagnética, em confronto direto com a bem estabelecida teoria de Maxwell.

²³ Einstein utiliza o nome quantum em seu trabalho. O nome fóton foi proposto em 1926 pelo Químico norte-americano Gilbert Newton Hewin (1875 – 1946). Retirado do livro: História da teoria quântica de Roberto de Andrade Martins e Pedro Sérgio Rosa.

Aplicando o princípio da conservação da energia; temos:

$$hf = W + T \quad (\text{II.6})$$

onde: h = constante de Planck

f = frequência do fóton incidente

T = energia cinética do fotoelétron emitido

W = energia potencial de ligação do elétron ou função trabalho.

A frequência limite, acima da qual o efeito ocorre e abaixo da qual não existe nenhum efeito, é conhecida como frequência de corte. No limite; temos: $T = 0$; então: $f_c = \frac{W}{h}$. O que mostra que o efeito fotoelétrico depende da frequência do fóton incidente e não da intensidade (quantidade) desses fótons.

Para facilitar a compreensão da observação do efeito fotoelétrico temos o esquema representado na figura II.8. Um tubo de vidro, no qual foi feito vácuo, contém uma placa metálica C, que está ligada ao terminal negativo da bateria, e uma placa A, ligada ao terminal positivo da bateria. Quando o tubo está no escuro, o amperímetro A indica ausência de corrente i . Quando a luz ilumina C, ocorre fluxo de carga entre A e C, pois elétrons (fotoelétrons) são ejetados da placa C e recolhidos pela placa A, e o amperímetro A acusa passagem de corrente elétrica.

Temos na Figura II.9 um gráfico da corrente fotoelétrica i em função da diferença de potencial V entre as placas A e C, para duas intensidades de luz monocromática incidentes. Conforme V vai aumentando, i também aumenta, até atingir um nível máximo, que daí em diante permanece constante. Isso ocorre quando todos os fotoelétrons emitidos em C são coletados em A. Se a luz incidente for mais intensa, o número de elétrons ejetados será maior e i também será maior. Quando inverte-se a polaridade entre A e C (A fica negativo e C positivo), os elétrons são repelidos por A. Somente os elétrons com uma energia cinética maior que a energia potencial $T > eV$ conseguirão chegar até A. Denomina-se potencial frenador ou potencial de corte V_0 , a voltagem inversa aplicada na qual nenhum elétron ejetado atinge A. (PERUZZO et al, 2013)

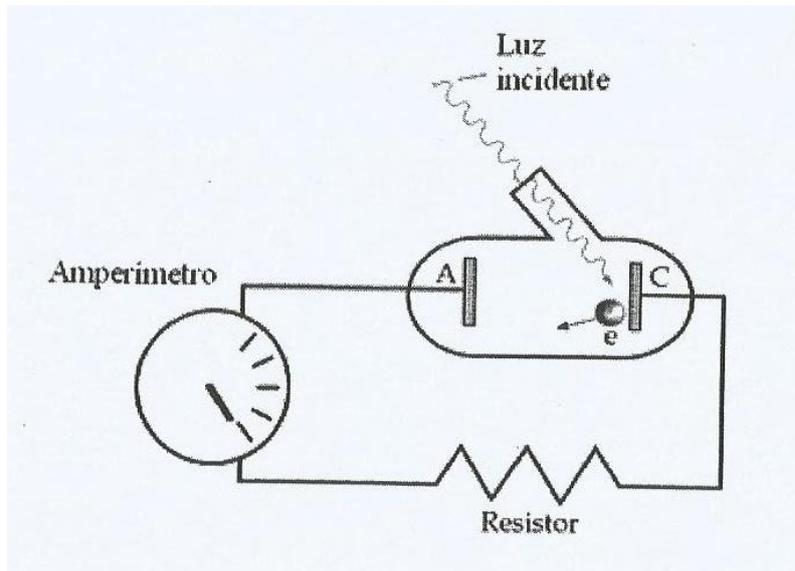


Figura II.8 – Esquema do efeito fotoelétrico. (PERUZZO et al, 2013).

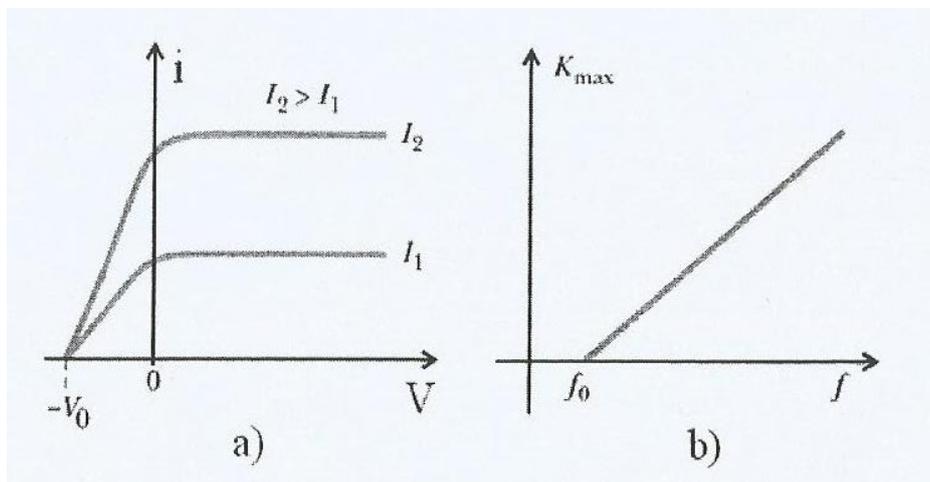


Figura II.9 – Gráfico de: (a) $i \times V$; (b) $K_{max} \times f$. (PERUZZO et al, 2013).

Para $V \leq V_0$ sempre tem-se ($i = 0$). Podemos dizer que a energia cinética máxima dos fotoelétrons é dada por $T_{máx} = eV_0$. Substituindo na equação II.6; temos:

$$hf = w + eV_0 \quad (II.7)$$

$$V_0 = \left(\frac{h}{e}\right) f - \left(\frac{w}{e}\right) \quad (II.8)$$

O que mostra que V_0 é linear para todos os materiais e tem o mesmo coeficiente angular ($tg\alpha = \frac{h}{e}$) para todos materiais.

A figura II.10 exemplifica o potencial de corte V_0 em função da frequência para três metais diferentes.

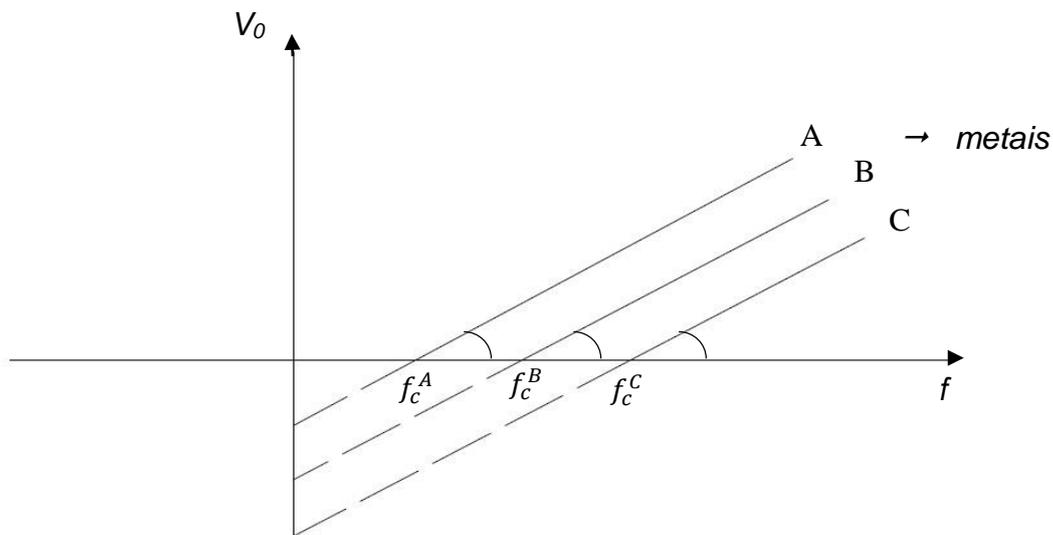


Figura II.10 – Potencial de corte em função da frequência.

Ou:
$$eV_0 = hf - W \quad \Rightarrow \quad T = hf - h\frac{W}{h} \quad (II.9)$$

$$T = hf - hf_c \quad \Rightarrow \quad T = h(f - f_c) \quad (II.10)$$

O que mostra que T varia linearmente com a frequência.

²⁴ Com $tg\alpha = \frac{h}{e}$ pode-se determinar a constante de Planck. Foi o que Millikan fez em 1916. O valor de e já tinha sido determinado por ele mesmo.

No efeito fotoelétrico o elétron está ligado a um átomo ou molécula e é predominante para baixas energias. Tem uma alta dependência do número atômico Z^n (n depende da energia do fóton incidente)²⁵.

A radiação característica já foi estudada na produção de raios X característico. A diferença é que não há produção de raios X de freamento, e observa-se apenas o espectro característico dos átomos. Esse fato é usado na técnica de caracterização de materiais, conhecido como método de PIXE (*Partícula Induced X ray Emission*).

Os dois elétrons da camada K dos átomos de alto número atômico respondem por aproximadamente 80% dos eventos de efeito fotoelétrico, o que confere a esse efeito um caráter quase ressonante entre a energia do fóton e a energia de ligação do elétron, ou seja, a probabilidade de interação é maior quando $hf = w$.

II.2.1 Distribuição angular dos elétrons

A direção de saída do fotoelétron em relação à incidência do fóton varia com a energia. Para altas energias (acima de 3 MeV), a probabilidade do elétron sair na direção e sentido do fóton é alta; Para baixas energias (abaixo de 20 keV) a maior probabilidade é a de sair com um ângulo de 70° . Isto é devido a ação dos campos elétrico e magnético que, variando na direção perpendicular à de propagação do fóton, exercem força sobre o elétron na direção de 90° , e se compõe com o momento angular do elétron (OKUNO, 2010). A figura II.11 representa o texto.

²⁵ Por isso, usa-se blindagem de chumbo para barrar as radiações X e γ .

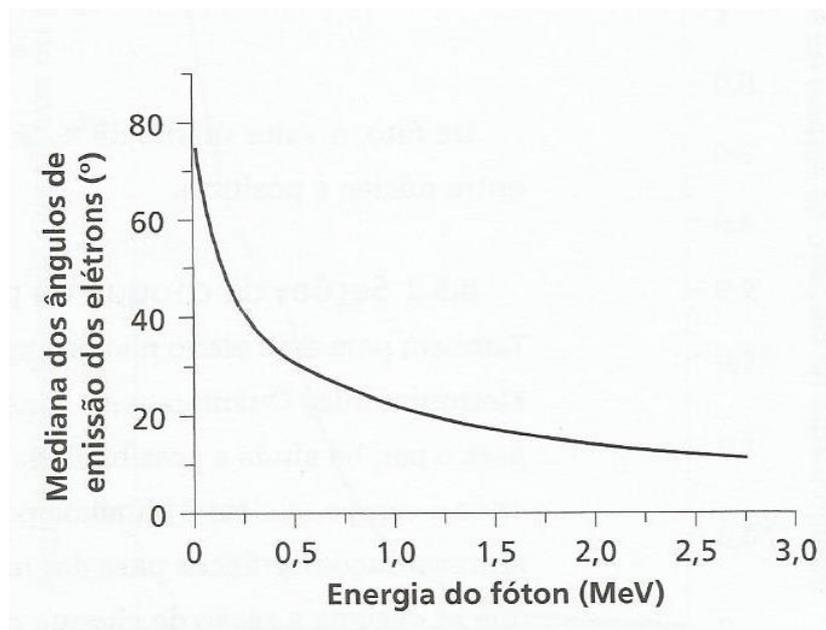


Figura II.11 – Mediana dos ângulos de emissão de fotoelétrons, em função da energia do fóton. Dados obtidos de Davisson e Evans (1952) (OKUNO, 2010).

II.3 Espalhamento Compton

Compton estudando o comprimento de onda da radiação espalhada, verificou que sempre existia um aumento desse comprimento de onda. Esse resultado era incompatível com a teoria de J. J. Thomson, segundo a qual a radiação espalhada deveria ter exatamente o mesmo comprimento de onda que a radiação incidente. Durante vários anos ele tentou explicar a variação observada do comprimento de onda dos raios X espalhados pela matéria, utilizando a teoria ondulatória. Depois de várias tentativas malsucedidas ele começou a explorar a hipótese dos quanta²⁶.

Compton calculou o efeito utilizando a dinâmica relativística para descrever o momentum e a energia do elétron, e considerando que cada quantum de raio X, com energia $E = hf$, deveria ter um momentum $p = \frac{E}{c}$.

²⁶ Compton, em nenhum lugar de seu artigo, se referia a Einstein. O interessante é que ele vai usar, também, a dinâmica relativística.

A figura II.12 representa o espalhamento, em que um quantum de raio X de comprimento de onda λ é espalhado por um elétron (considerado livre) de massa m .

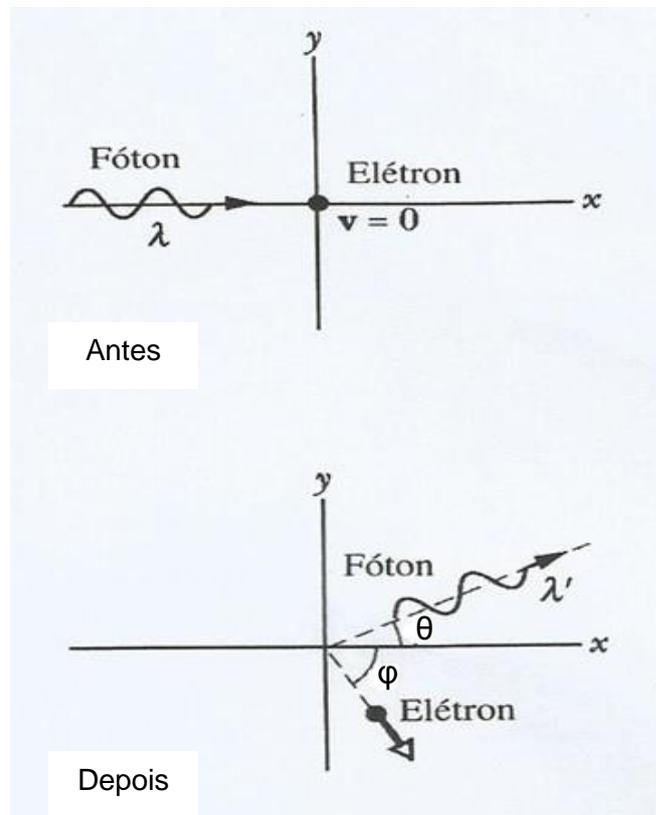


Figura II.12 – Um fóton de comprimento de onda λ atinge um elétron em repouso. O fóton é espalhado sob o ângulo θ com comprimento de onda maior λ' . O elétron se afasta com a velocidade v , sob o ângulo φ .

Compton, em 1923, publica no seu artigo a fórmula para se calcular o comprimento de onda λ' espalhado:

$$\lambda' = \lambda + \left(\frac{2h}{mc}\right) \text{sen}^2 \left(\frac{\theta}{2}\right) \quad (\text{II.11})$$

Depois de uma manipulação trigonométrica, encontramos a solução ²⁷:

$$\lambda' = \lambda + \frac{h}{mc} (1 - \cos\theta) \quad (II.12)$$

onde $\frac{h}{mc}$ é denominado de comprimento de onda Compton, e seu valor é: $\lambda_c = 0,0243 \text{ \AA}$.

Compton achou surpreendente que a mudança do comprimento de onda dependesse apenas do ângulo, e não do comprimento de onda inicial. Entretanto, esse resultado correspondia exatamente os seus experimentos. A figura II.13 mostra os resultados obtidos por Compton.

A diferença $\lambda' - \lambda = \Delta\lambda$ (deslocamento Compton) é igual, para a luz visível e para os raios X. Entretanto, a variação fracional de λ ($\Delta\lambda / \lambda$) é muito maior para os raios X do que para a luz visível. Assim, o fenômeno é mais facilmente observado quando se usa comprimentos de ondas curtos, como os raios X e os raios γ .

²⁷ $\cos(\theta + \alpha) = \cos\theta \cos\alpha - \sin\theta \sin\alpha$. Para $\theta = \alpha$; temos: $\cos 2\theta = \cos^2\theta - \sin^2\theta$.

Mas: $\cos^2\theta = 1 - \sin^2\theta$; então: $\cos 2\theta = 1 - \sin^2\theta - \sin^2\theta = 1 - 2\sin^2\theta$.

Assim, $\sin^2\theta = \frac{1 - \cos 2\theta}{2}$; então: $\sin^2 \frac{\theta}{2} = \frac{1 - \cos\theta}{2}$. Substituindo na equação II.11 encontramos o resultado mais conhecido.

²⁸ Com a equação II.12 pode-se calcular a constante de Planck. Para isso, basta colocar o detector no ângulo de 90° .

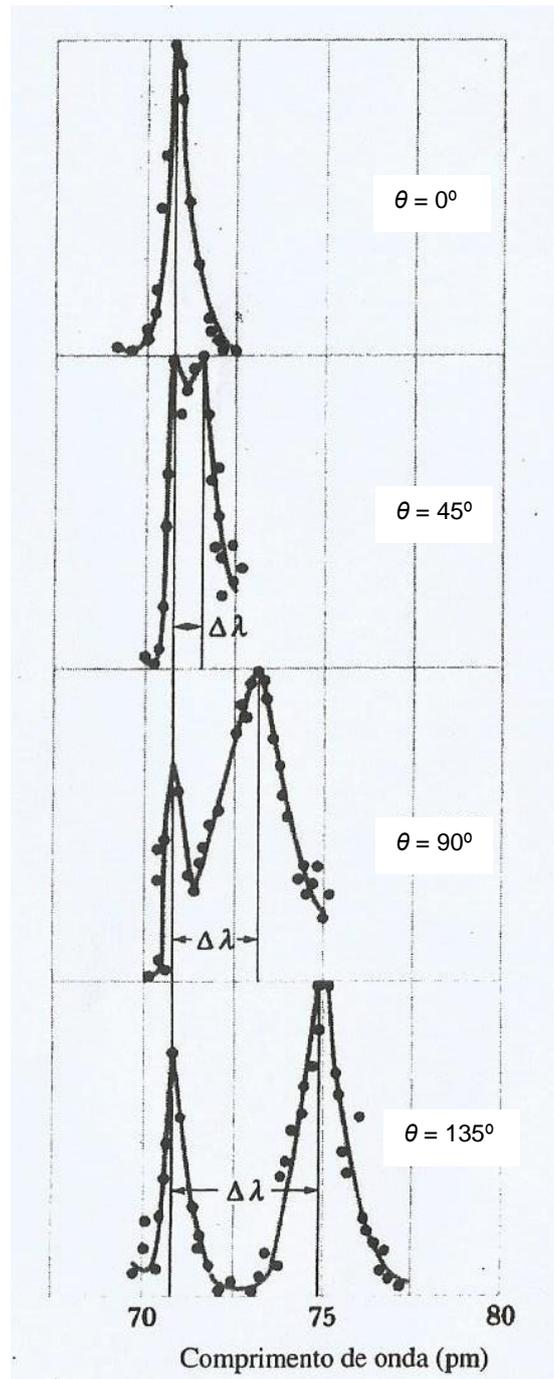


Figura II.13 – Resultados de Compton para quatro valores do ângulo de espalhamento θ . Observe que o deslocamento Compton $\Delta\lambda$ aumenta com o aumento o ângulo de espalhamento. (HALLIDAY, 2012)

O pico no qual o comprimento de onda não altera é devido ao espalhamento por elétrons que não são livres, ou seja, que estão firmemente ligados aos átomos do alvo.

II.3.1 Seção de choque de espalhamento Compton

A seção de choque diferencial $\left(\frac{d\sigma}{d\Omega}\right)$ de espalhamento Compton é descrita pela equação de Klein-Nishina, que é muito importante na compreensão de técnicas que usam esse efeito como princípio.

$$\frac{d\sigma}{d\Omega} = r_0^2 \left[\frac{1}{1 + \alpha(1 - \cos\theta)} \right]^3 \left[\frac{1 + \cos^2\theta}{2} \right] \cdot \left[1 + \frac{\alpha^2(1 - \cos\theta)^2}{(1 + \cos^2\theta)[1 + \alpha(1 - \cos\theta)]} \right] \quad (\text{II.13})$$

onde: $\alpha = \frac{hf}{mc^2}$ e r_0 é o raio clássico do elétron.

A probabilidade total de espalhamento Compton, por unidade de ângulo sólido, é a soma das probabilidades de espalhamento devido a cada elétron isoladamente. A figura II.14 apresenta as curvas de seção de choque diferencial para fótons incidentes de várias energias.

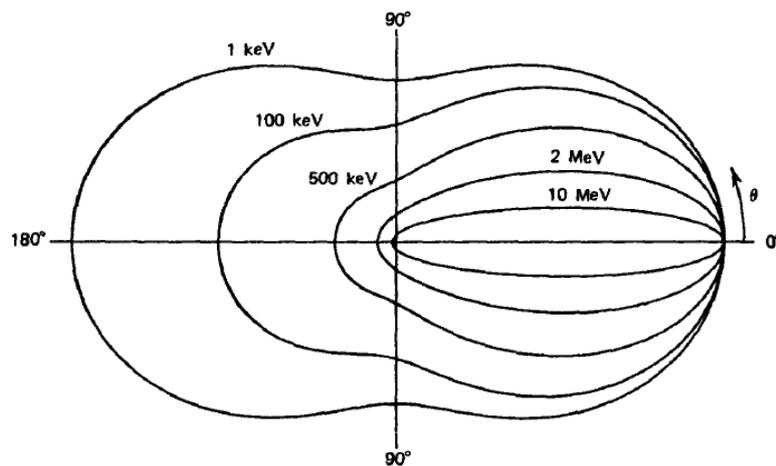


Figura II.14 - Um diagrama polar do número de fótons (incidente a partir da esquerda) Compton dispersos em uma unidade de ângulo sólido, com o ângulo de espalhamento θ . As curvas são mostradas para as energias iniciais indicadas (KNOLL, 2000)

A figura II.14 mostra que o espalhamento Compton tende para uma isotropia (a radiação é espalhada igualmente em todas as direções), para energias baixas dos fótons incidentes.

A seção de choque diferencial por fótons espalhados de um ângulo θ , por unidade de ângulo sólido e por elétrons, pode também ser escrita desta forma:

$$\frac{d\sigma}{d\Omega} = \frac{r_0^2}{2} \left(\frac{hf'}{hf} \right)^2 \left(\frac{hf}{hf'} + \frac{hf'}{hf} - \text{sen}^2\theta \right) \quad (\text{II.14})$$

Onde:
$$hf' = \frac{hf}{1 + \left(\frac{hf}{mc^2} \right) (1 - \cos\theta)}$$

Para energias baixas; temos: $hf \cong hf'$. Logo:

$$\frac{d\sigma}{d\Omega} = \frac{r_0^2}{2} (2 - \text{sen}^2\theta) \quad \Rightarrow \quad \frac{d\sigma}{d\Omega} = \frac{r_0^2}{2} (1 + \cos^2\theta) \quad (\text{II.15})$$

Portanto, a equação reduz-se a seção de choque clássica (de Thomson). Assim, para energias baixas do fóton incidente, o espalhamento para ângulos frontal e traseiro é igualmente provável, sendo menor a probabilidade de espalhamento a 90° .

II.3.2 Intensidade do feixe espalhado

O texto a seguir é fortemente influenciado pela dissertação de Mestrado de Cristyane Silva de Oliveira (fevereiro de 2009).

Quando se incide um feixe colimado de radiação gama ou X sobre um determinado material, pode-se calcular a sua densidade eletrônica na região de incidência do feixe. Para isso, é necessário medir a quantidade de fótons, que ao sofrerem espalhamento Compton, são emitidos em um determinado ângulo θ .

A região formada pela interseção dos ângulos sólidos, gerados pelo colimador da fonte e do detector é conhecida como VOXEL. A intensidade dos fótons que sofrem espalhamento nesta região e que são coletados pelo detector é diretamente proporcional à densidade eletrônica média no interior do VOXEL.

A intensidade de um feixe infinitesimal de raios gama, espalhados em um elemento de volume dV , e que alcança o detector, é dada por (ANJOS, 1991):

$$I = D_e \int_{\Delta v} \Phi \int_{\theta} \frac{d\sigma}{d\Omega} d\Omega dv \quad (\text{II.16})$$

Considerando-se, as atenuações nos feixes de raios gama e espalhado, temos:

$$I = D_e \int_{\Delta v} \Phi \exp\left(-\int_{x_i} \mu(E_i, x_i) dx\right) \exp\left(-\int_{x_e} \mu(E_e, x_e) dx\right) \cdot \exp \int_{\theta} \frac{d\sigma}{d\Omega} d\Omega dv \quad (\text{II.17})$$

A equação II.17 é chamada de equação geral do espalhamento Compton e pode ser apresentada de uma forma abreviada.

$$I = TA_i TA_e TE \quad (\text{II.18})$$

Onde:

TA_i : representa o termo de atenuação no feixe incidente;

TA_e : representa o termo de atenuação no feixe espalhado e

TE : representa o termo de espalhamento no VOXEL.

Se os coeficientes de atenuação na equação II.17 forem considerados constantes, ela pode ser escrita como:

$$I = TE \exp(-\mu_i x_i) \exp(-\mu_e x_e) \quad (\text{II.19})$$

Onde: $TE = D_e \int_{\Delta v} \Phi \frac{d\sigma}{d\Omega} d\Omega dv$

A seção de choque diferencial do espalhamento Compton é aproximadamente constante em todo o VOXEL. Portanto, temos:

$$TE = D_e \frac{d\sigma}{d\Omega} \int_{\Delta v} \Phi \Omega dv \quad (\text{II.20})$$

Para um sistema fonte-detector fixado em uma determinada geometria (ângulo de espalhamento, colimação) a equação II.20 pode ser escrita como:

$$TE = K D_e \quad (\text{II.21})$$

Onde: $K = \frac{d\sigma}{d\Omega} \int_{\Delta v} \Phi \Omega dv$

Substituindo (II.21) em (II.18) e desconsiderando as contribuições do multiespalhamento, obtemos a equação simplificada para o espalhamento Compton:

$$I = KD_e \exp(-\mu x_i) \exp(-\mu_e x_e) \quad (\text{II.22})$$

Onde:

- ✓ K é uma constante de proporcionalidade que engloba a eficiência do sistema de detecção, a seção de choque diferencial do espalhamento Compton, o ângulo sólido subtendido entre o detector e o centro do VOXEL e a intensidade do feixe de raios gama incidente.
- ✓ D_e é a densidade eletrônica média no interior do VOXEL.
- ✓ x_i e x_e são os caminhos percorridos pelos feixes incidentes e espalhados no material.
- ✓ μ_i e μ_e são os coeficientes de absorção linear para os feixes incidentes e espalhados no material.

No ambiente acadêmico existe uma disputa (não declarada explicitamente) entre pesquisadores experimentais e teóricos. Uma teoria só tem sentido se for verificada experimentalmente, entretanto, ninguém entra em um laboratório experimental, vazio de conteúdo teórico. As acusações podem ser resumidas nesta frase: Você não sabe o que está fazendo, mas sabe fazer (pesquisador experimental). Eu sei o que você está fazendo, mas não sei fazer (pesquisador teórico).

Apresentamos um texto teórico básico, mas o nosso trabalho é essencialmente experimental. O próximo capítulo, trata do arranjo experimental, dos materiais usados e da metodologia utilizada.

CAPÍTULO III

MATERIAIS E MÉTODOS

O que caracteriza o método científico é a procura da verdade e não a verdade em si. A sua configuração da realidade pode ser questionada e todos têm o privilégio da repetitividade, desde que os materiais e métodos sejam os mesmos.

(Carlos Castro)

No meio científico toda palavra dita precisa estar fundamentada teoricamente e toda teoria, para ser aceita, precisa de sua comprovação. Os materiais utilizados e a metodologia aplicada definiram os objetivos aspirados.

Este capítulo é de extrema importância para o comprometimento dos resultados. Cada material utilizado apresenta uma função individual, e a metodologia aplicada tem o papel de unificá-los. É preciso trabalhar em conjunto.

III.1. Fonte de Radiação X

Para a realização deste trabalho foi utilizado o equipamento de raios x fabricado pela *Oxford Instruments X-Ray Technology*, com potência de 75 W, tensão máxima de 50 kV e corrente máxima de 1500 μ A. Este equipamento possui anodo de tungstênio e janela de berílio de 125 μ m de espessura.

III.2. Sistema de Detecção

Uma vez definida a fonte a ser utilizada, o próximo passo é a escolha do sistema de detecção. O detector deve ser capaz de operar na faixa de energia selecionada apresentando alta eficiência e uma resolução satisfatória.

O detector utilizado foi o modelo XR-100T com cristal de Telureto de Cádmio (CdTe) de dimensão 3 x 3 x 1 mm³, janela de berílio (Be) com diâmetro de 4,9 mm, fabricado pela Amptek. O detector possui um módulo eletrônico modelo PX2T que fornece a voltagem DC necessária para operar o XR-100T e processar o sinal através do amplificador. O sinal de saída a partir do módulo eletrônico PX2T foi conectado diretamente a um analisador multicanal modelo Pocket MCA 8000A, ambos fabricados pela Amptek.

III.3. As Amostras

O sistema fonte-detector precisa falar a mesma linguagem e a escolha da amostra torna-se dependente deste conjunto e daquilo que espera-se encontrar. Em resumo, pode-se dizer que o nosso objetivo é detectar a presença de água em *risers* flexíveis (tubos flexíveis). Os *risers* flexíveis possuem características complexas, são constituídos de diversas camadas de materiais diferentes conforme descrito no anexo I.

III.3.1. Amostra 1: tubo plástico

Com o objetivo de compreender experimentalmente o comportamento do retroespalhamento Compton em diferentes condições e obter a confiabilidade do sistema, foi utilizado um tubo plástico de fio dental. Este tubo (Figura III.1) possui um diâmetro de 30 mm e a espessura de sua parede é de apenas 2 mm, produzindo um mínimo de interferência no estudo.



Figura III.1 – Amostra 1: Tubo plástico

III.3.2. Amostra 2: *Riser* Simulado

Esta amostra foi cortada de um tubo *riser* de 4" (101,6 mm). A camada correspondente a Armadura de Tração foi retirada a fim de facilitar a compreensão dos fenômenos causados pela interferência dos materiais constituintes, uma vez que foi possível aumentar o volume de ar/água contido no tubo. O diâmetro e a espessura das camadas estão descritos na figura III.2. É importante observar que a retirada de uma das camadas ocasionou um aumento de espessura, na região modificada, que não compromete a confiabilidade dos resultados.

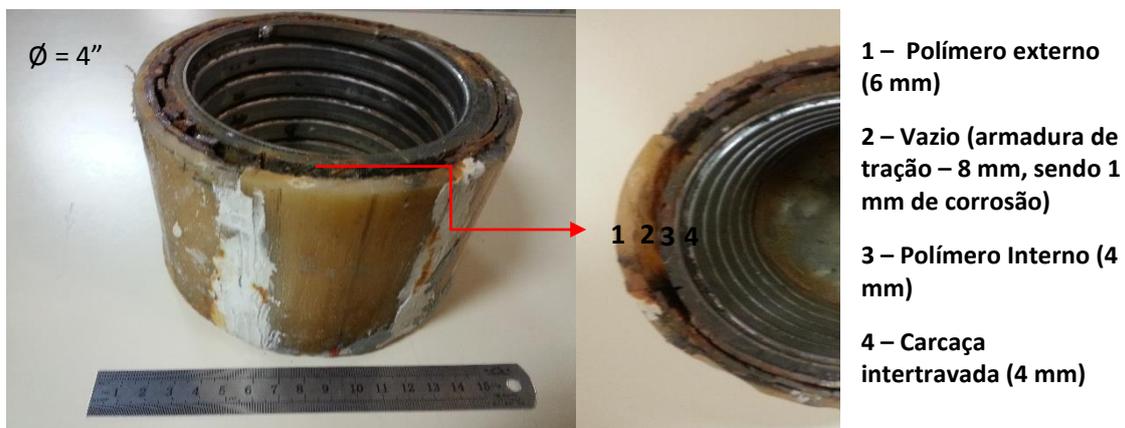


Figura III.2 – Amostra 2: *Riser* simulado (vista frontal e superior).

III.3.3. Amostra 3: *Riser* Flexível

A nossa terceira (Figura III.3) amostra trata-se de uma região localizada a 180° da região utilizada na amostra 2. Nesta amostra foram preservadas todas as camadas²⁹ constituintes de um *riser* flexível com objetivo de visualizar, em conjunto, todos os fenômenos estudados anteriormente nas amostras 1 e 2, bem como analisar novas ocorrências ainda não observadas.



Figura III.3 – Amostra 3: *Riser* flexível (vista frontal e superior).

III.4. Metodologia

III.4.1. Descrição Geral do Arranjo Experimental

A metodologia de montagem para o arranjo experimental foi baseada nos fundamentos descritos no capítulo II.

O arranjo experimental foi montado conforme ilustra a figura III.4. A fonte foi posicionada de modo a proporcionar um feixe incidente perpendicular à amostra. O detector foi posicionado a um ângulo de 70° em relação à fonte, de maneira a detectar o retroespalhamento. O módulo PX2T e o analisador multicanal foram conectados ao detector e ao *notebook*. Um suporte, utilizado para posicionar a amostra, foi alinhado e apoiado sobre uma mesa dotada de um sistema de rotação e translação (Z) acionados

²⁹ O *riser* utilizado neste trabalho não possui a camada Armadura de Pressão.

manualmente, onde Z é paralelo ao feixe incidente. Uma régua posicionada sobre a mesa foi usada como referência para marcar os passos na direção Z.

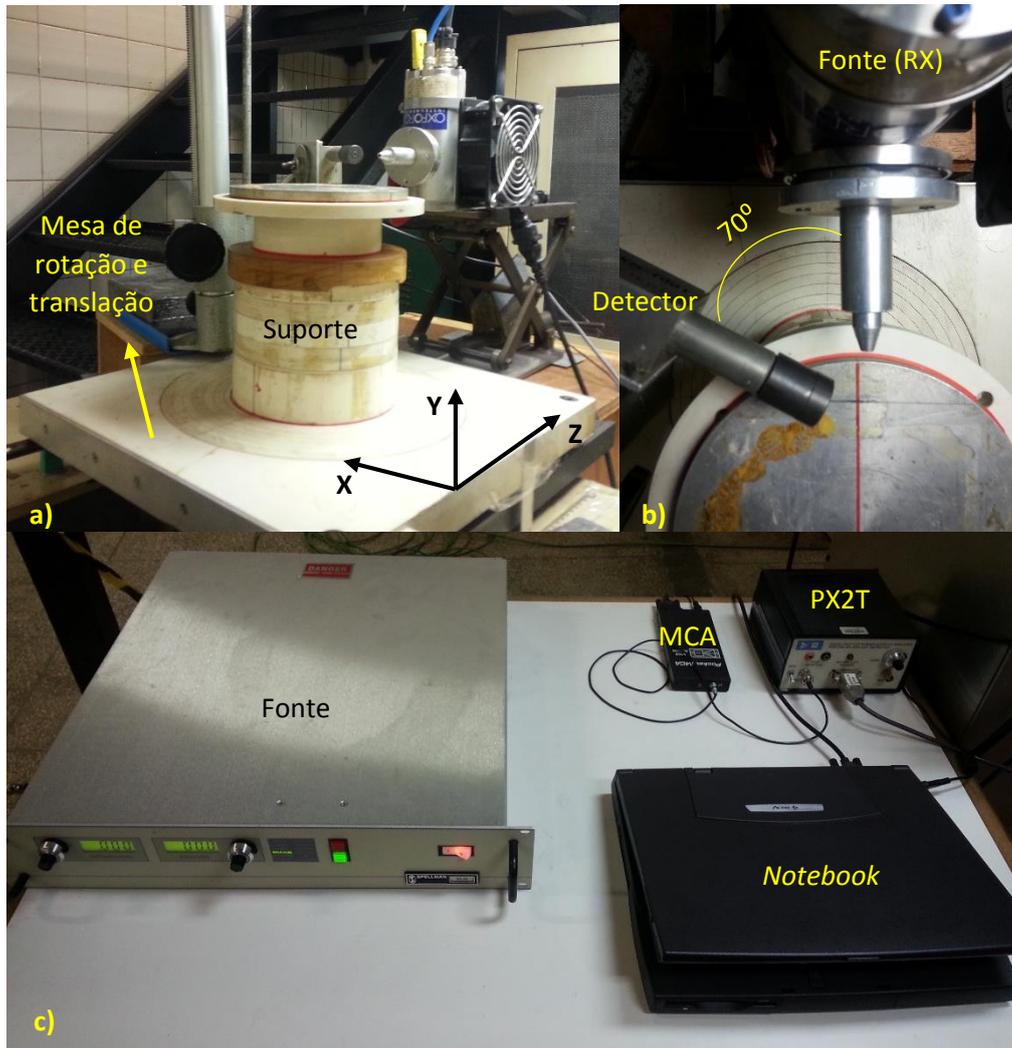


Figura III.4 – Arranjo experimental. a)visão geral b)visão superior c)sistema de aquisição

III.4.2. Sistema de colimação

Se fizermos uma análise microscópica dos efeitos de interação da radiação com a matéria conseguiremos imaginar que em 1mm cabem aproximadamente 10 milhões de fótons no comprimento de onda dos raios x. Se trouxermos este pensamento para o mundo clássico ficará claro a necessidade de um sistema de colimação.

Dizemos que um feixe é paralelo quando ele está colimado. Colimar significa ter em vista, pretender. Em princípio, o que desejamos é obter um feixe comportado, com o mínimo de divergência. Divergir é afastar-se, desviar-se. Convergir é tender ou dirigir-se para o mesmo ponto.

A resolução do sistema é dependente, dentre outras coisas, da colimação. Uma colimação adequada reduz a radiação de fundo que chega ao detector e evita que múltiplos espalhamentos alcancem o mesmo. A interseção entre o feixe incidente e o feixe espalhado determinam uma região que chamamos de volume de inspeção (voxel).

Para a realização dos experimentos foram utilizados colimadores de alumínio e de chumbo no sistema fonte-detector, respectivamente. Ambos os colimadores apresentam vazadura paralela. Suas dimensões estão descritas na figura III.5.

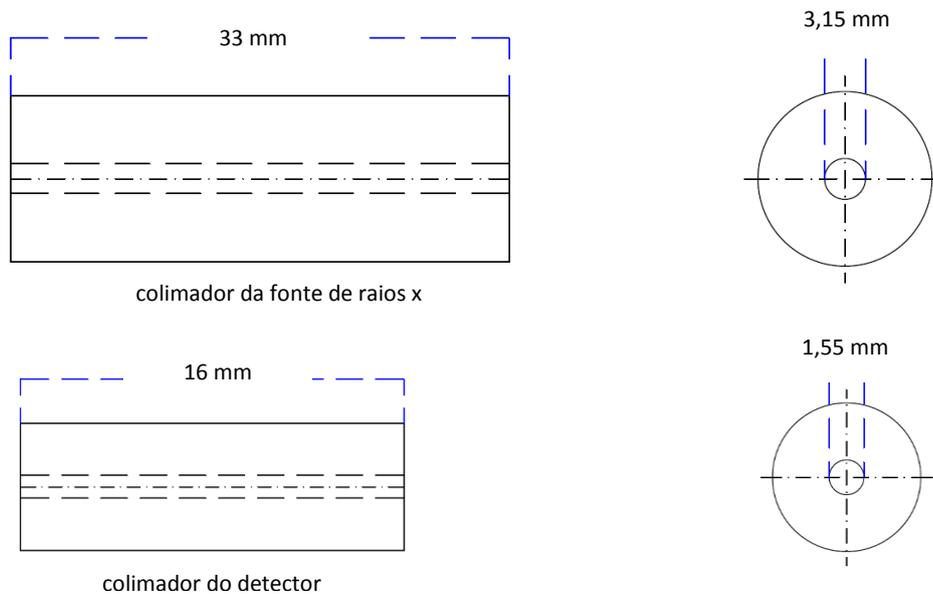


Figura III.5 – Colimadores utilizados no sistema fonte-detector.

O espalhamento Compton, conforme descrito no capítulo II, torna-se praticamente isotrópico para energias abaixo de 100 keV. Portanto, a dependência angular, neste caso, torna-se apenas uma questão de optar entre aumentar/reduzir a seção de choque ou aumentar/reduzir a atenuação do feixe.

Foi usado um voxel com menor volume possível para iniciar o estudo. Por questões de mobilidade e disposição espacial foi determinado um ângulo de espalhamento de 250° . A partir das dimensões dos colimadores e seus respectivos posicionamentos no sistema fonte-detector, foi possível determinar a divergência e calcular teoricamente a área correspondente ao volume de inspeção (Figura III.6).

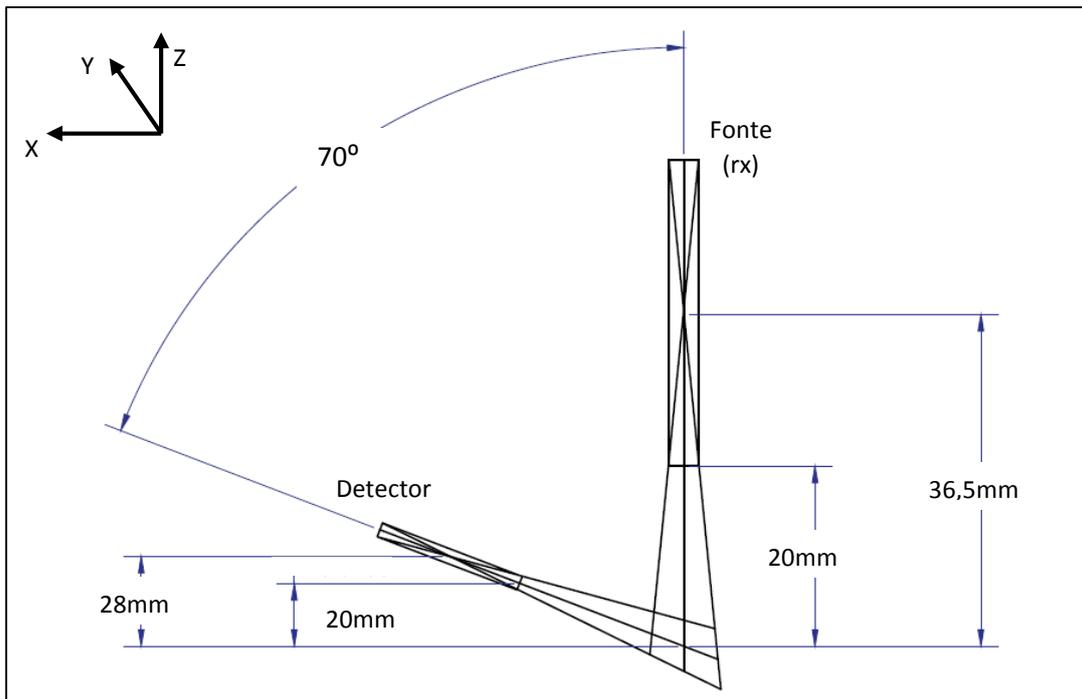


Figura III.6 – Configuração do arranjo experimental (figura fora de escala).

O cálculo da divergência produzida pelos colimadores de vazadura paralela foi realizado através da proporcionalidade entre triângulos semelhantes, como demonstrado na figura III.7.

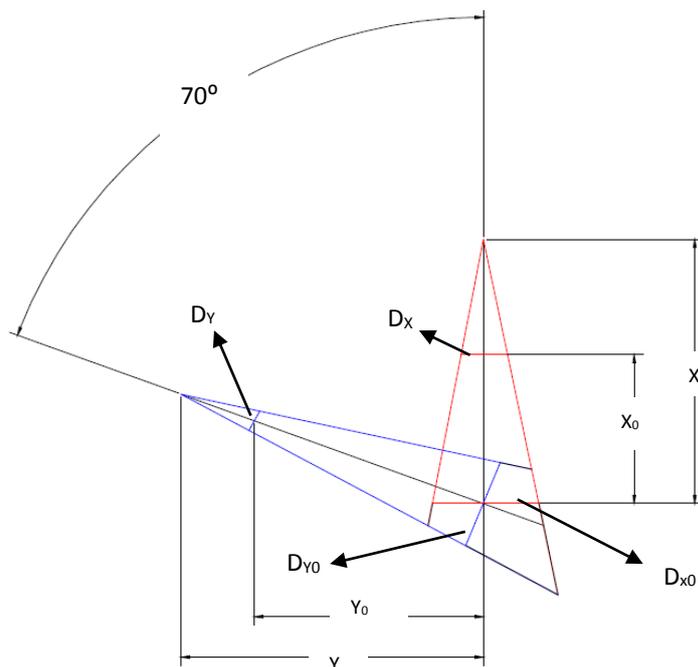


Figura III.7 – Demonstração da divergência causada pelos colimadores.

Para posterior alinhamento e verificação do sistema ao início de cada experimento, utilizou-se duas varetas pontiagudas, com diâmetro igual à vazadura dos respectivos colimadores, onde o ponto de coincidência entre elas foi marcado como sendo o centro do volume de inspeção.

III.4.3. Calibração do Sistema

A calibração do sistema de inspeção consiste basicamente em preparar todo o arranjo experimental juntamente com o sistema eletrônico de contagens, de modo que os erros sistemáticos sejam minimizados (OLIVEIRA, 2009).

A calibração em energia é utilizada para se obter uma constante de proporcionalidade entre os números de canais do MCA e a energia do fóton. Neste trabalho a calibração foi realizada a partir de uma fonte gama de ^{241}Am , onde foi

possível determinar a faixa de energia a ser utilizada na aquisição dos espectros. Os limites escolhidos foram 13,95 keV e 59,54 keV conforme demonstrado na figura III.8.

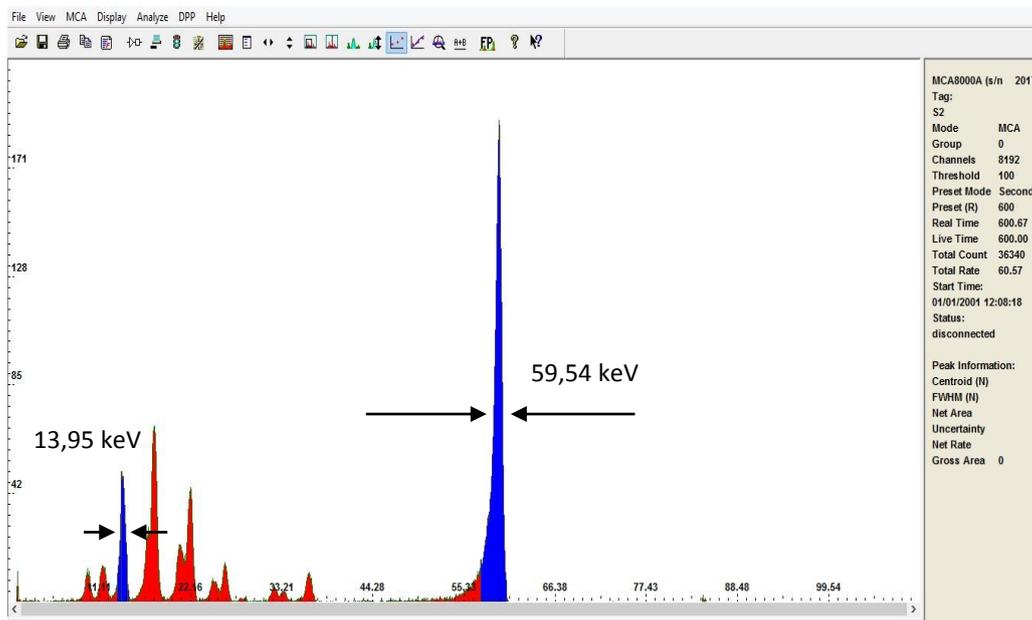


Figura III.8 – Espectro de calibração do analisador multicanal para uma fonte gama de ^{241}Am .

A tabela III.1 mostra as energias escolhidas juntamente com seus respectivos canais fornecidos pelo programa do analisador multicanal. Uma reta de calibração (Figura III.9) foi traçada a partir desses pontos, relacionando canal e energia.

Tabela III.1 – Energias características da fonte gama de ^{241}Am com seus respectivos canais.

Energia (keV)	Canal
13,95	1027
17,74	1460
59,54	4408

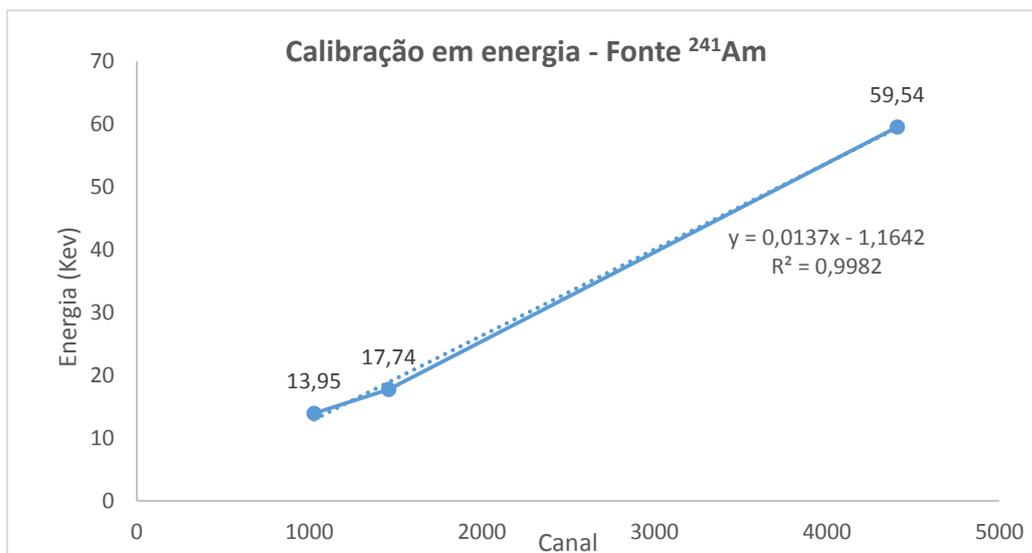


Figura III.9 – Reta de calibração em energia - fonte gama de ^{241}Am .

III.4.4. Procedimento experimental

Todos os procedimentos foram realizados obedecendo aos parâmetros de inspeção indicados na tabela III.2.

Tabela III.2 – Descrição dos parâmetros experimentais

Tensão	Corrente	Tempo de contagem	Ganho do PX2T
45 kV	800 μA	200 s	11

Embora já demonstrado teoricamente, a área do volume de inspeção foi verificada experimentalmente através da exposição de uma folha de cádmio, de espessura inferior a 1mm, ao feixe incidente. O ponto de coincidência das ponteiras, que determina o

centro do voxel, foi encostado na superfície da folha de cádmio marcando o ponto inicial. A folha de cádmio foi afastada em passos de 1mm até que não pudesse mais ser visualizado seu espectro diferencial. Assim, obtivemos uma medida de 16 mm que equivale a distância do centro do voxel até a linha perpendicular à ponta do mesmo, como demonstra o esquema ilustrado na figura III.10. Esta linha perpendicular e o centro do voxel são medidas fixas de referência utilizadas em todas os experimentos para demarcar a localização do voxel na amostra.

O arranjo experimental utilizado foi descrito anteriormente. É importante salientar que as medidas foram realizadas em diferentes condições, entretanto foi preservado o exato posicionamento de maneira que os erros fossem minimizados.

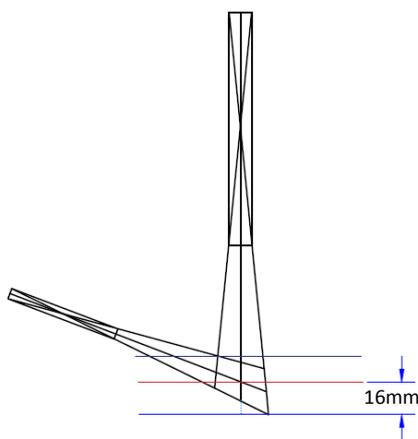


Figura III.10 – Representação da distância do centro do voxel até a linha perpendicular que demarca a ponta do mesmo.

III.4.4.1. Metodologia de inspeção para a Amostra 1: Tubo plástico

A amostra foi posicionada sobre o suporte alinhado à mesa. A superfície da amostra foi encostada no ponto de coincidência das ponteiros para verificar o alinhamento e posteriormente retornada a posição que demarca a ponta do voxel. Foram realizadas 25 varreduras, em passos de 1 mm na direção Z, nas condições sem água e com água potável, respectivamente.

Ao analisarmos os pontos de maior significância dos efeitos foram realizadas 10 varreduras, em passos de 1 mm, na direção Z, na condição com água do mar. O esquema está representado na figura III.11.

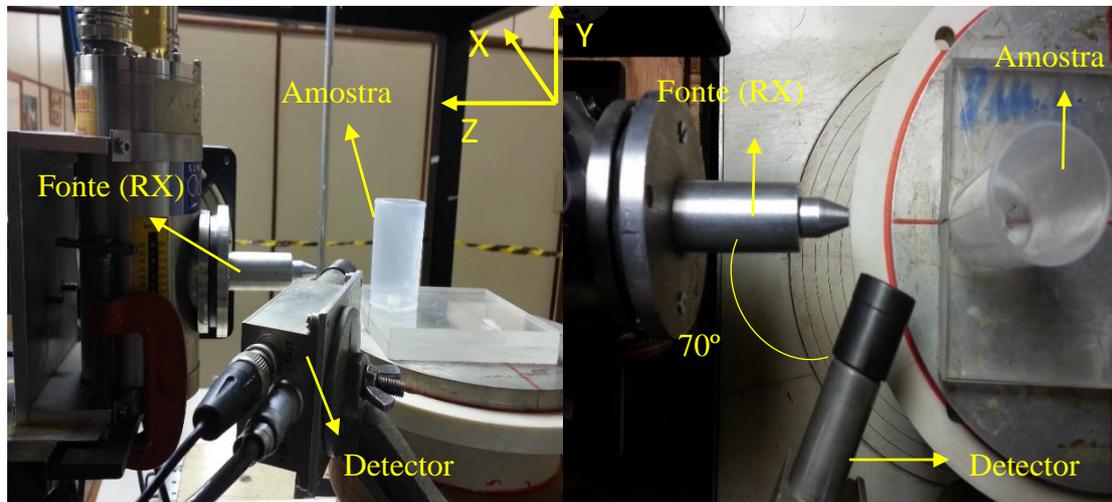


Figura III.11 – Arranjo experimental para a Amostra 1: Tubo plástico (visão lateral e superior).

III.4.4.2. Metodologia de inspeção para as Amostras 2 (*Riser Simulado*) e 3 (*Riser Flexível*)

A amostra foi posicionada sobre o suporte alinhado à mesa. A superfície da amostra foi encostada no ponto de coincidência das ponteiros para verificar o alinhamento e posteriormente retornada a posição que demarca a ponta do voxel.

Durante a aquisição observou-se que não havia diferença notável entre os espectros realizados na superfície e a alguns milímetros dentro do polímero. Portanto foram realizadas 18 varreduras para a amostra 2 e 17 varreduras para a amostra 3, iniciando a 3 mm dentro do polímero externo, em passos de 1mm na direção Z, nas condições sem água, com água potável e com água do mar, respectivamente. Os arranjos estão descritos nas figuras III.12 e III.13.

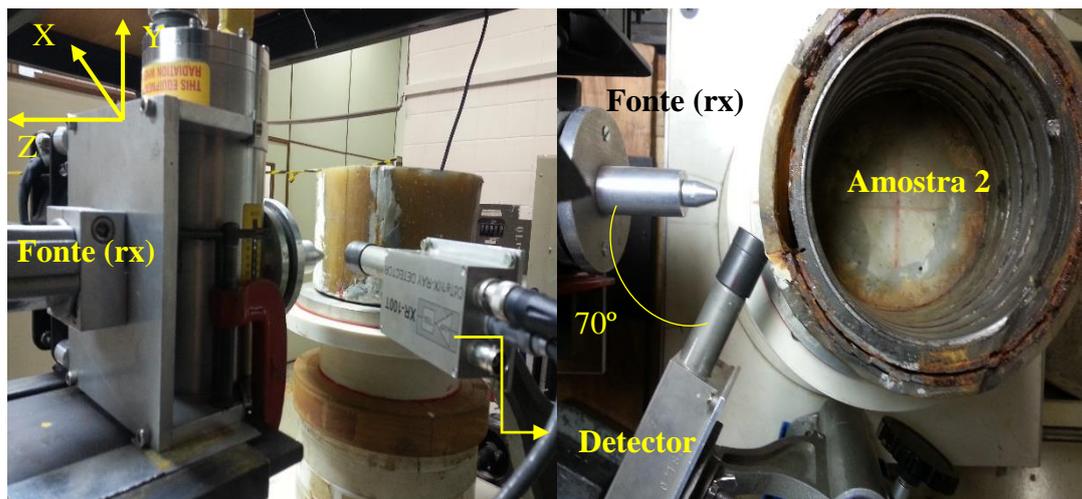


Figura III.12 – Arranjo experimental para a amostra 2: *Riser Simulado*.

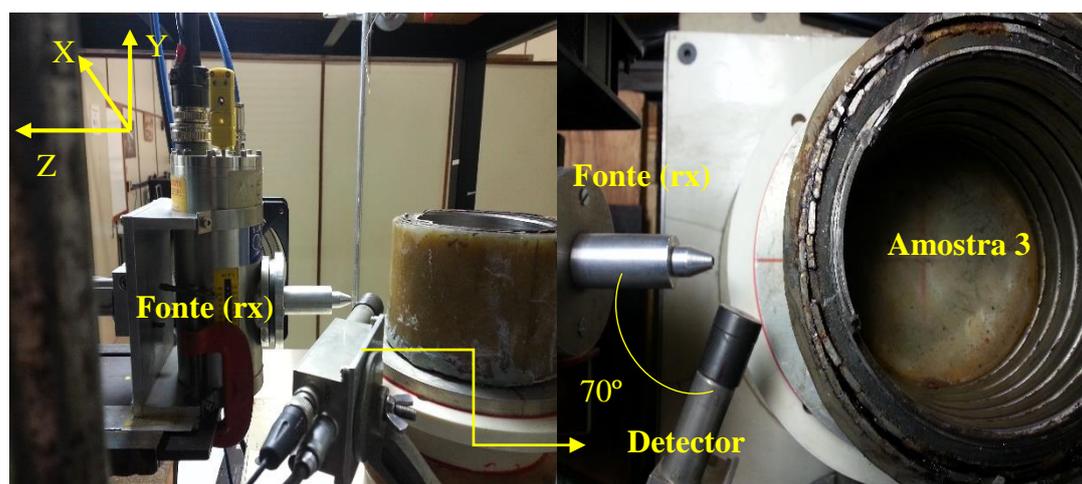


Figura III.13 – Arranjo experimental para a amostra 3: *Riser Flexível*.

III.4.5. Alteração no arranjo experimental para a Amostra 3: *Riser Flexível*

No decorrer da análise dos resultados experimentais verificou-se a necessidade de varrer em maior profundidade a 3ª amostra, além de evidenciar ainda mais as diferenças entre as condições sem água, com água potável e com água do mar. Para tal a distância fonte-amostra foi aumentada em 7 mm e foi modificado o ângulo de abertura entre a fonte e o detector, passando de 70° para 60°, e consequentemente

reduzindo o ângulo de espalhamento para 240° . O novo esquema está representado na figura III.14.

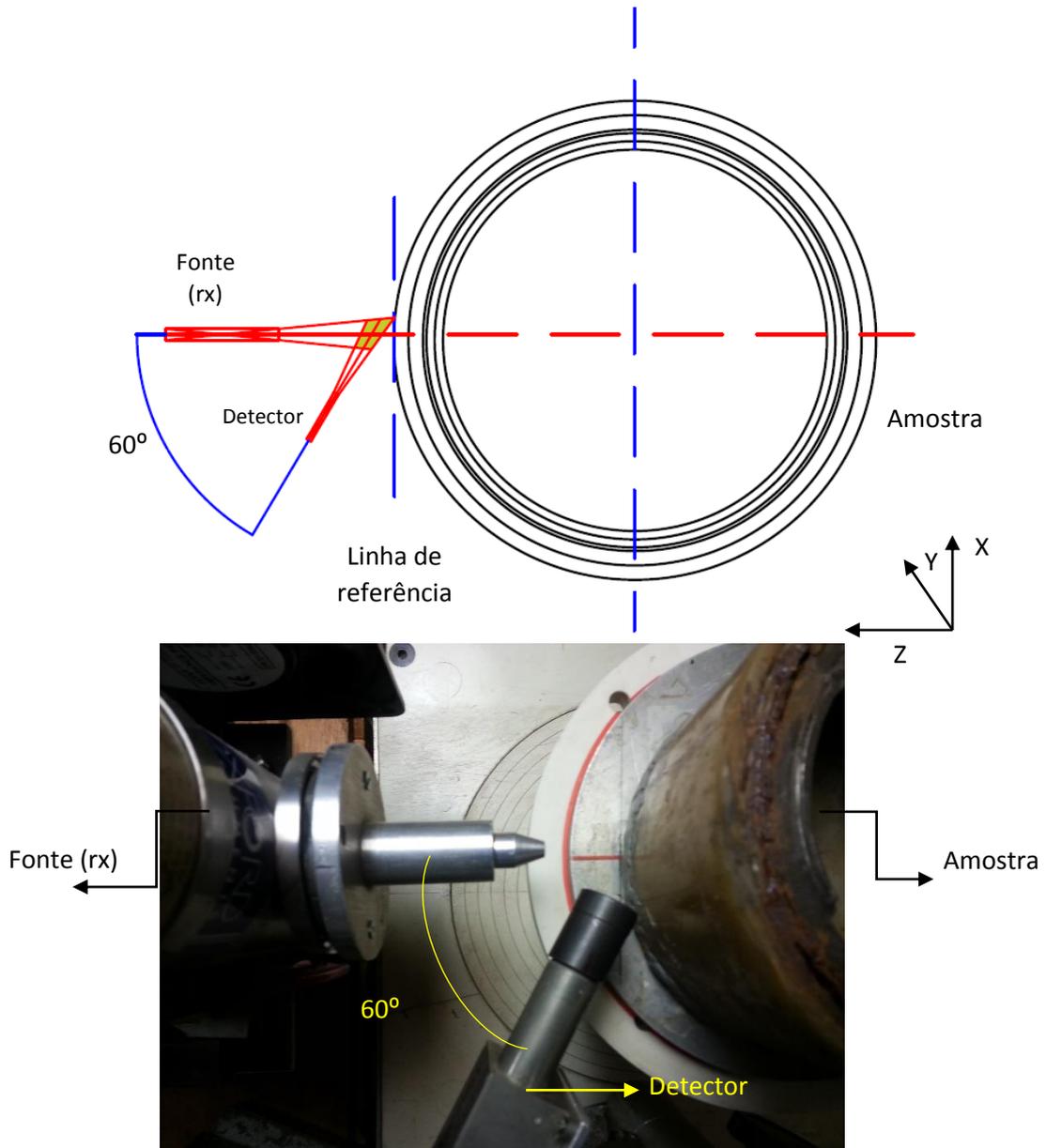


Figura III.14 – Esquema experimental após alteração do ângulo.

Essas alterações proporcionaram um aumento do volume de inspeção que passou a ter uma distância de seu centro a ponta (reta perpendicular à ponta) de 20 mm, medida experimentalmente pelo método da folha de cádmio.

Em seguida foram realizadas 22 varreduras, em passos de 1 mm, iniciando na superfície do tubo, na direção Z, nas condições sem água, com água potável e com água do mar.

A epígrafe, citada no início desse capítulo, diz que uma das características da ciência é a repetitividade para as mesmas condições experimentais. Esse capítulo assegura essa possibilidade e fecha o ciclo de conhecimentos básicos para se realizar experiência com espalhamento Compton. O capítulo IV mostra os resultados obtidos dos espectros, por espalhamento Compton, em tubo *riser* flexível.

CAPÍTULO IV

APRESENTAÇÃO DOS RESULTADOS

O homem é a medida de todas as coisas.

*Protágoras*³⁰

Todas as coisas são medidas pelo homem.

*Niels Bohr*³¹

Empiricamente deixemos os fatos falarem por si. Mas um pouco de filosofia não faz mal a ninguém.

O que é realidade? A cultura do ser humano carrega consigo essa pergunta e muitas tentativas de explicação. Durante anos a filosofia assumiu a responsabilidade do conhecimento da realidade do mundo. Com o desenvolvimento do método científico, a filosofia passou a ser uma reflexão sobre o conhecimento do mundo, que passou a ser dado pela ciência. O método científico mudou a realidade filosófica subjetiva do ser humano, levando-o para o laboratório experimental, para uma realidade filosófica objetiva.

³⁰ Filósofo grego do século V a.c.

³¹ Niels Henrik David Bohr (1885-1962). Bohr não escreveu esta frase, mas achamos que ele poderia ter escrito. Bohr era um idealista (atitude filosófica que nega a existência de uma realidade objetiva do mundo independente do sujeito) e são suas essas frases (com alguma mudança nossa, mas que não muda a essência do seu pensamento):

Não existe realidade profunda. O mundo em torno de nós é real, mas flutua em um mundo não real. A realidade é criada pela observação, portanto na ausência de observação, não existe qualquer realidade. A observação (o sujeito) cria a realidade e a posição e quantidade de movimento de um ente quântico não existem antes de serem observados.

Para Bohr a realidade é uma realidade medida e um ente quântico (elétron) antes da realização de uma medida, encontra-se em todo estado possível (princípio da superposição). O ato de medir trás para o nosso mundo uma possibilidade (colapso da função de onda) e as demais somem instantaneamente.

Para adequar as frases ao nosso século, trocaríamos a palavra homem por ser humano.

Qualquer que seja a nossa opção filosófica, não tem como nos retirar desse processo: Na compreensão das leis da natureza, na criação de tecnologia, na criação do instrumental de medição e da leitura dada pelo instrumento de medição.

Como resultado deste estudo serão apresentados espectros obtidos nas condições sem água, com água potável e com água do mar. A organização deu-se da seguinte maneira: em cada figura podemos observar 3 espectros comparativos, nas respectivas situações descritas anteriormente, na mesma posição determinada pela régua sobre a mesa, milímetro a milímetro em cada varredura. Os espectros obedecem a distribuição de Poisson.

IV.1. Amostra 1: Tubo plástico

Nesta amostra, que possui um diâmetro de 30 mm, embora realizadas varreduras em toda a sua extensão, iniciou-se a comparação na posição que corresponde a 1 mm de seu centro até a profundidade de 23 mm (figuras IV.1 a IV.10).

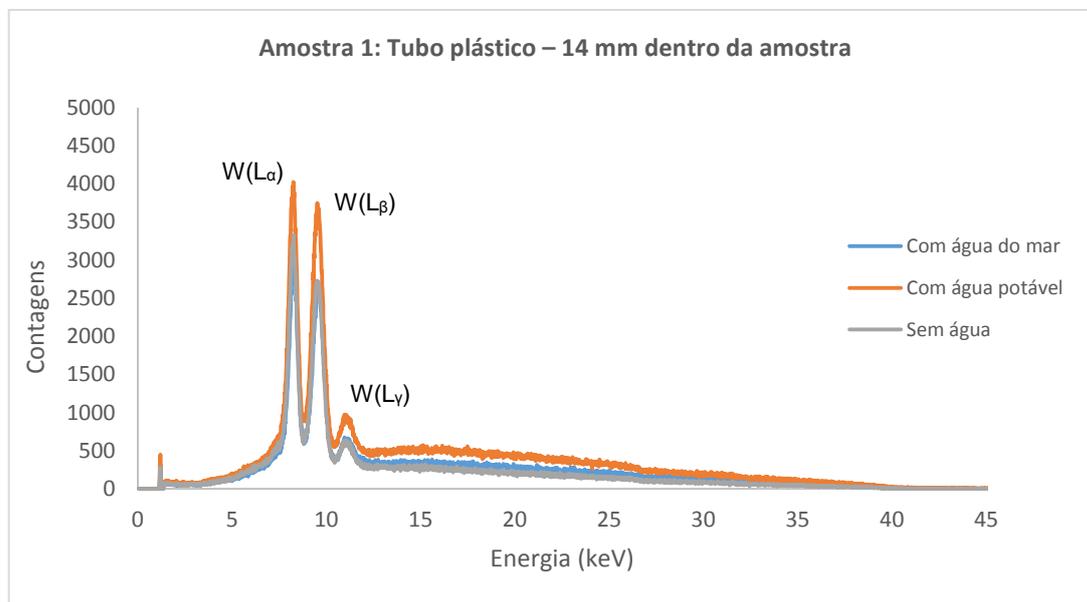


Figura IV.1 – Espectros na profundidade de 14 mm dentro da amostra.

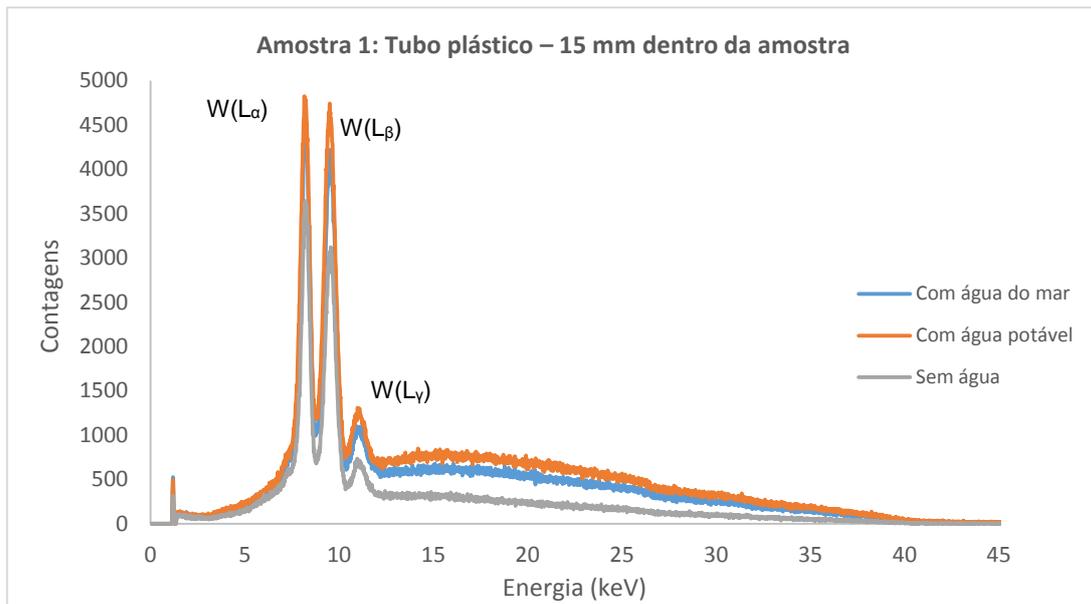


Figura IV.2 – Espectros na profundidade de 15 mm dentro da amostra

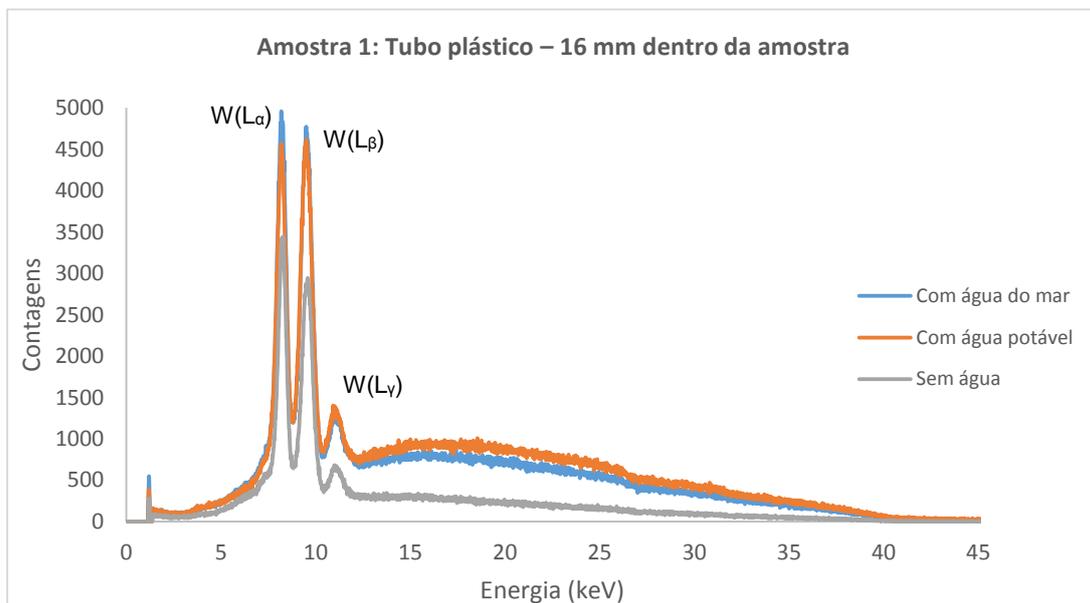


Figura IV.3 – Espectros na profundidade de 16 mm dentro da amostra

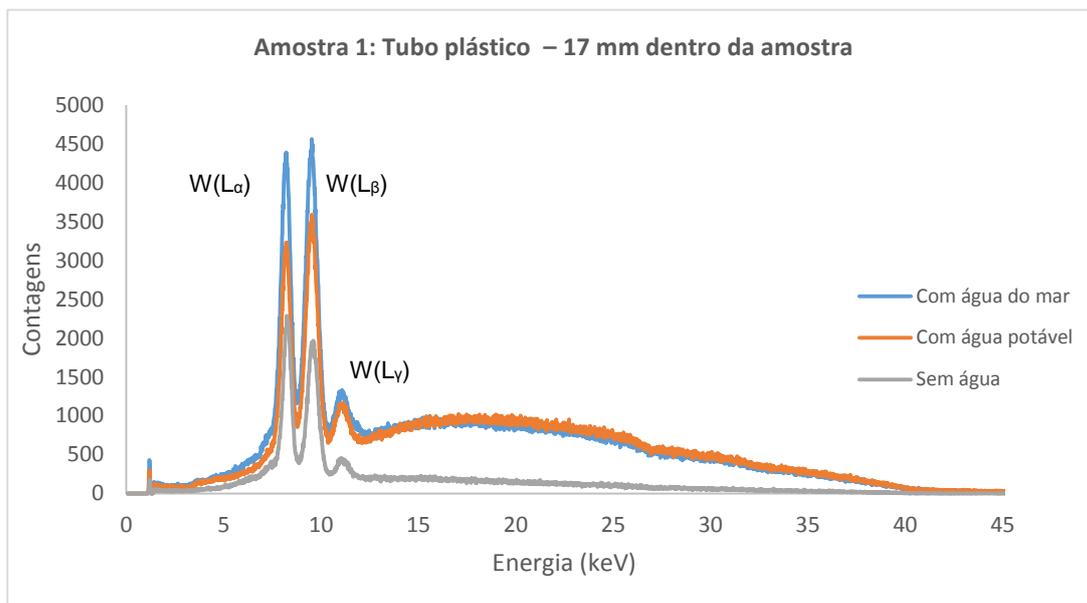


Figura IV.4 – Espectros na profundidade de 17 mm dentro da amostra

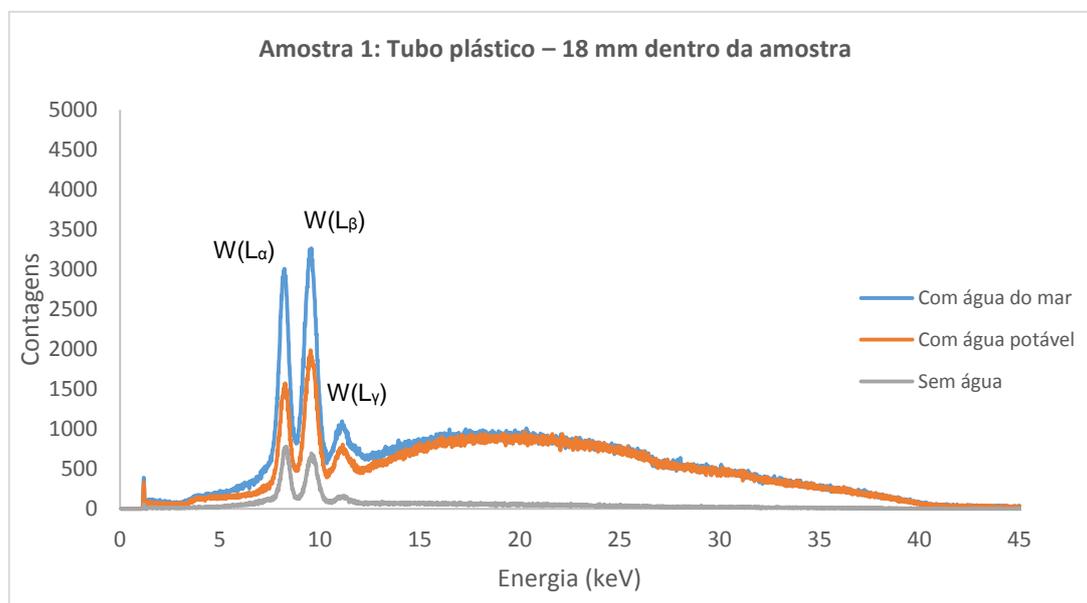


Figura IV.5 – Espectros na profundidade de 18 mm dentro da amostra

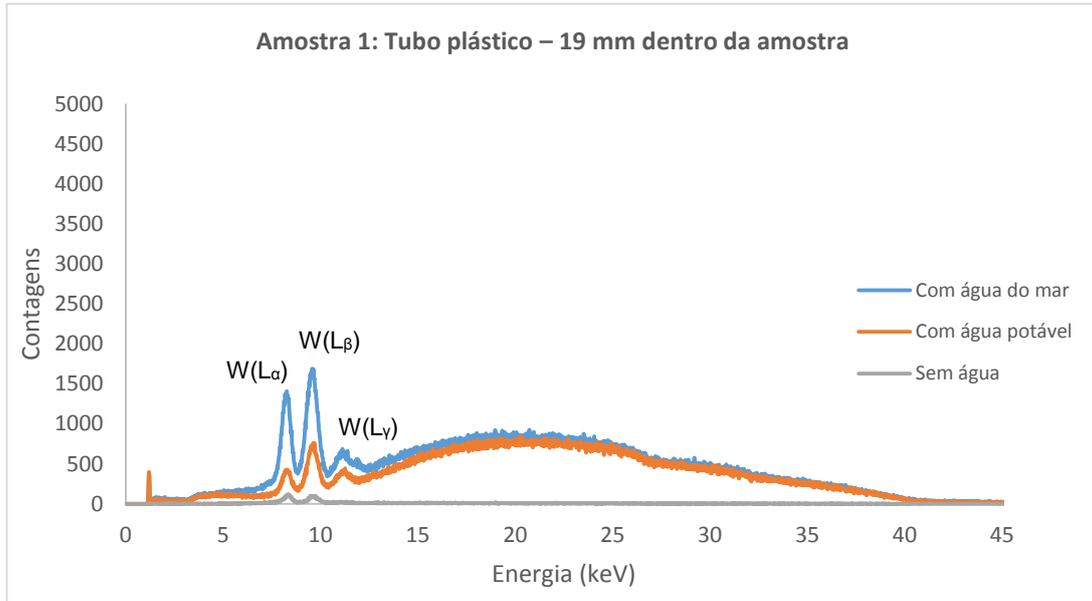


Figura IV.6 – Espectros na profundidade de 19 mm dentro da amostra

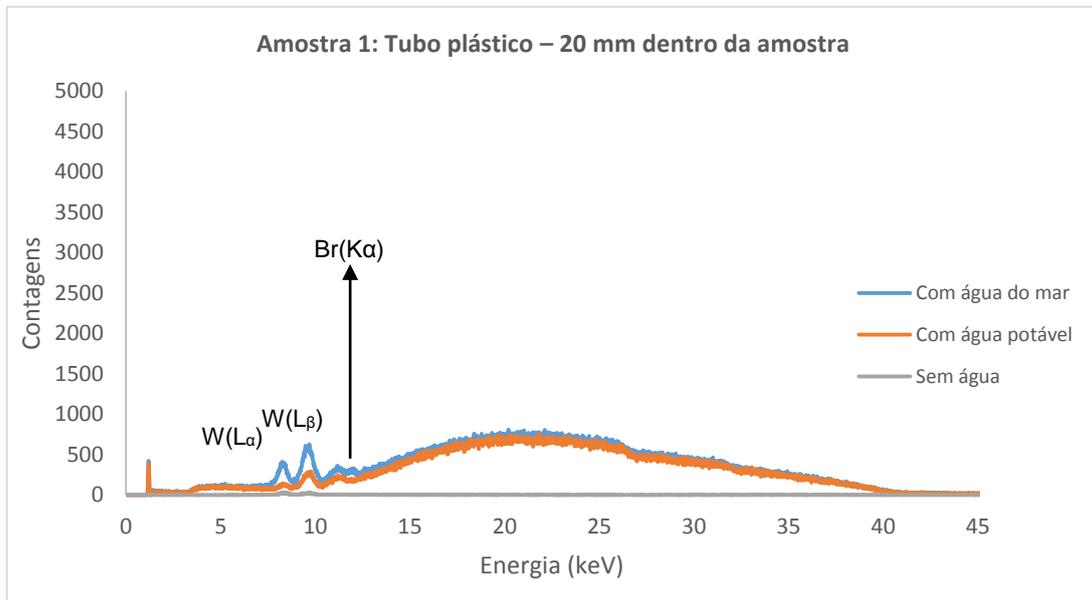


Figura IV.7 – Espectros na profundidade de 20 mm dentro da amostra

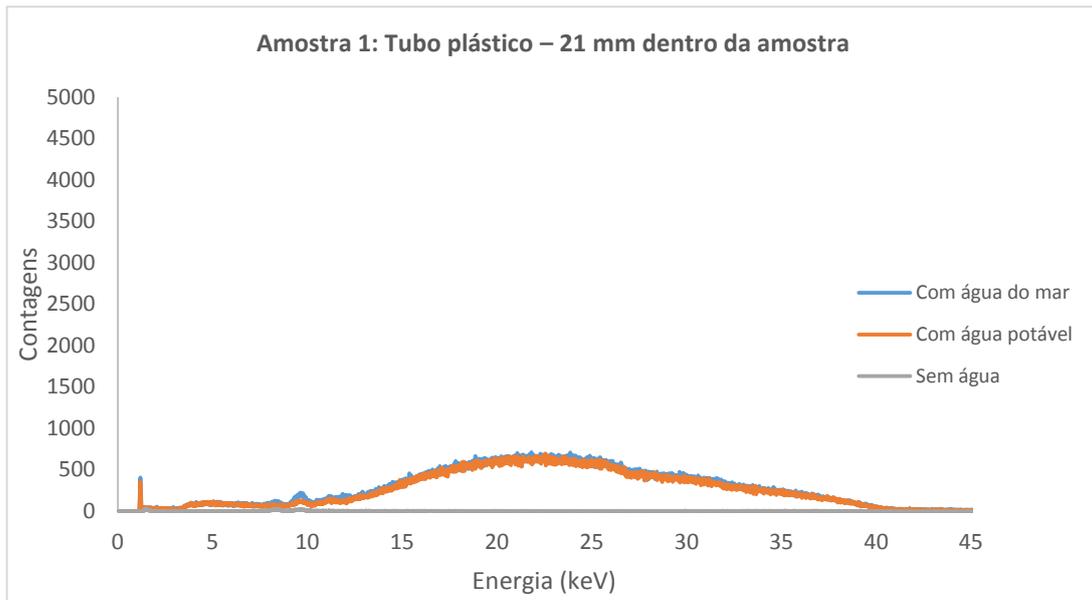


Figura IV.8 – Espectros na profundidade de 21 mm dentro da amostra

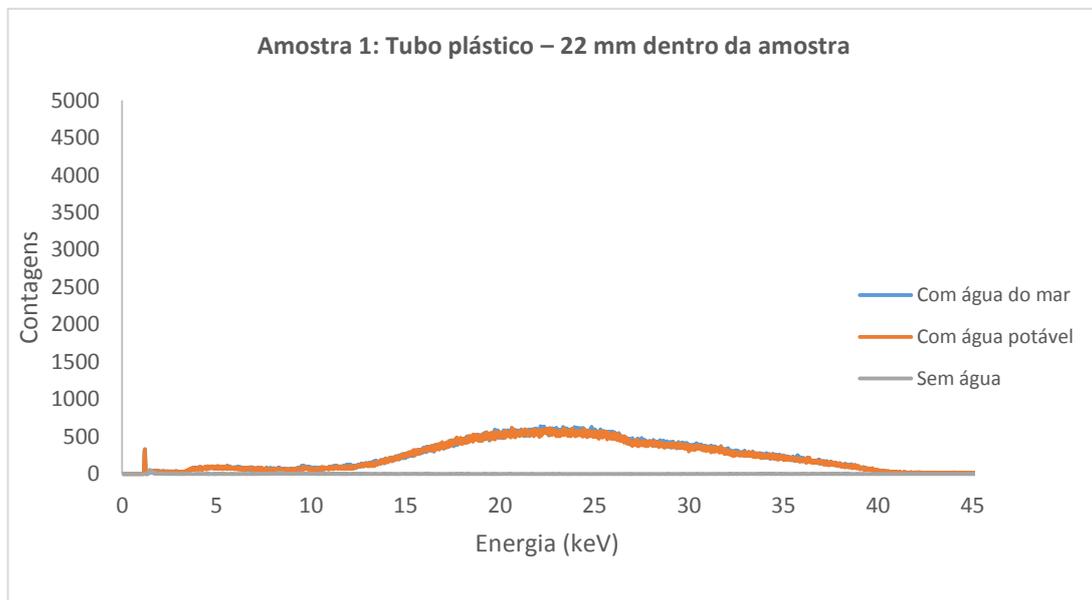


Figura IV.9 – Espectros na profundidade de 22 mm dentro da amostra

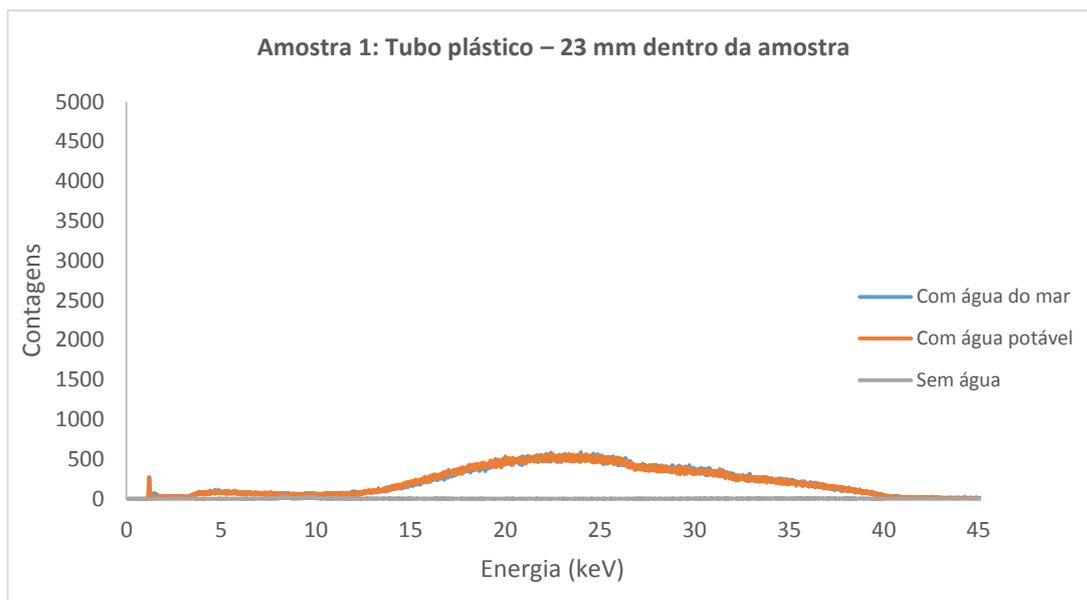


Figura IV.10 – Espectros na profundidade de 23 mm dentro da amostra

IV.2. Amostra 2: Riser Simulado

Nas figuras IV.11 a IV.28 estão demonstrados os espectros obtidos a partir da amostra 2 (riser simulado).

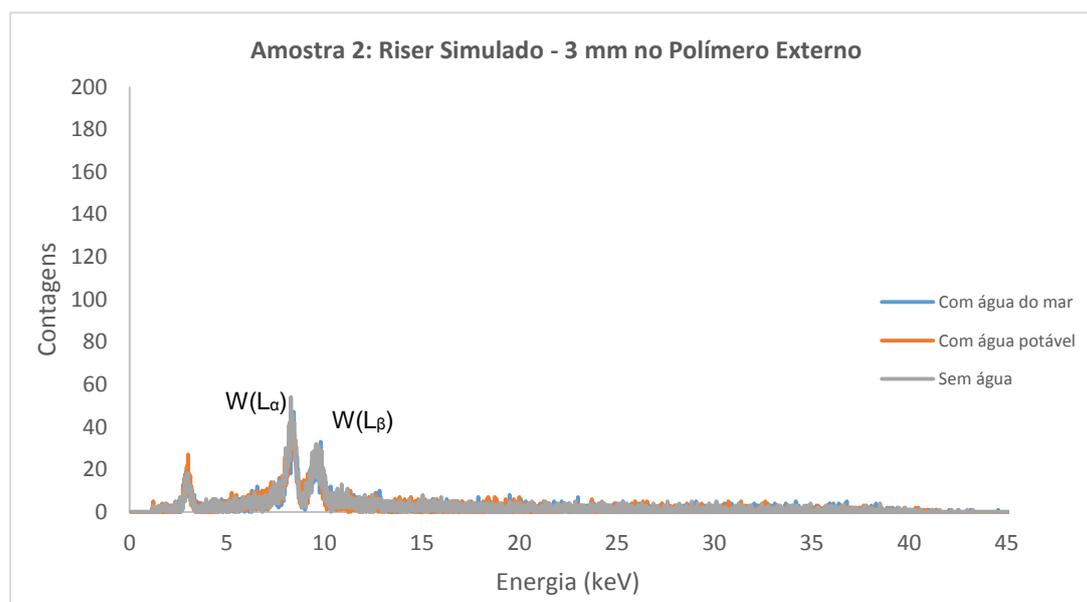


Figura IV.11 – Espectros na profundidade de 3 mm na camada polimérica externa

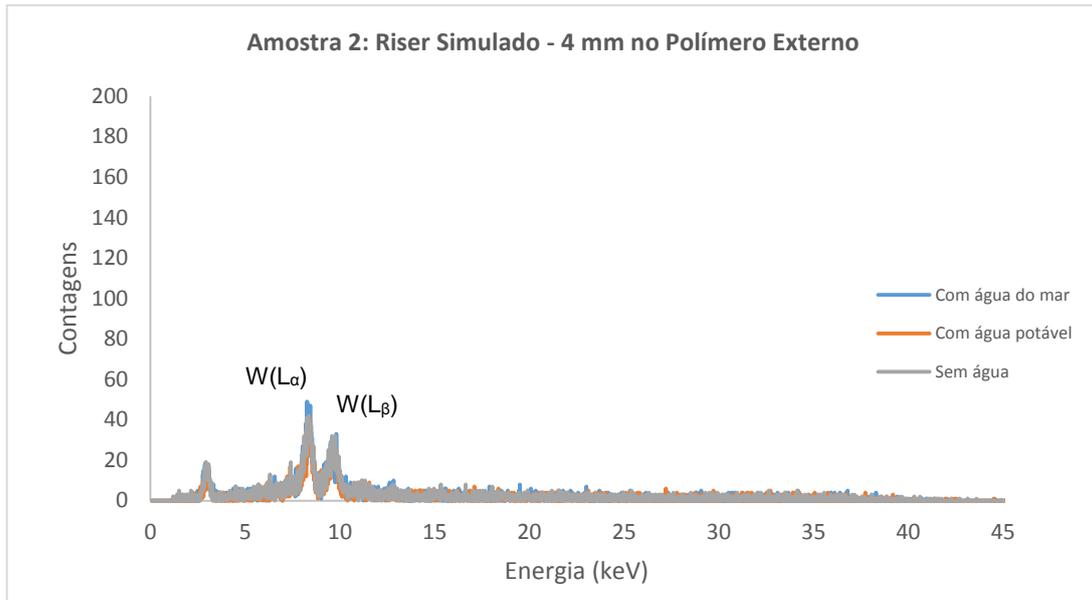


Figura IV.12 – Espectros na profundidade de 4 mm na camada polimérica externa

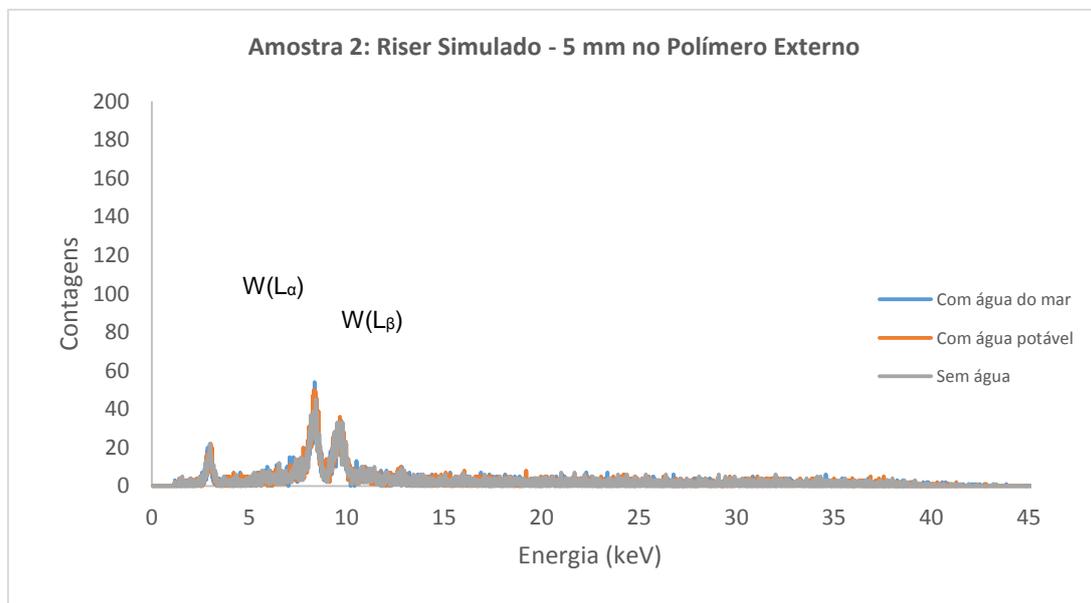


Figura IV.13 – Espectros na profundidade de 5 mm na camada polimérica externa

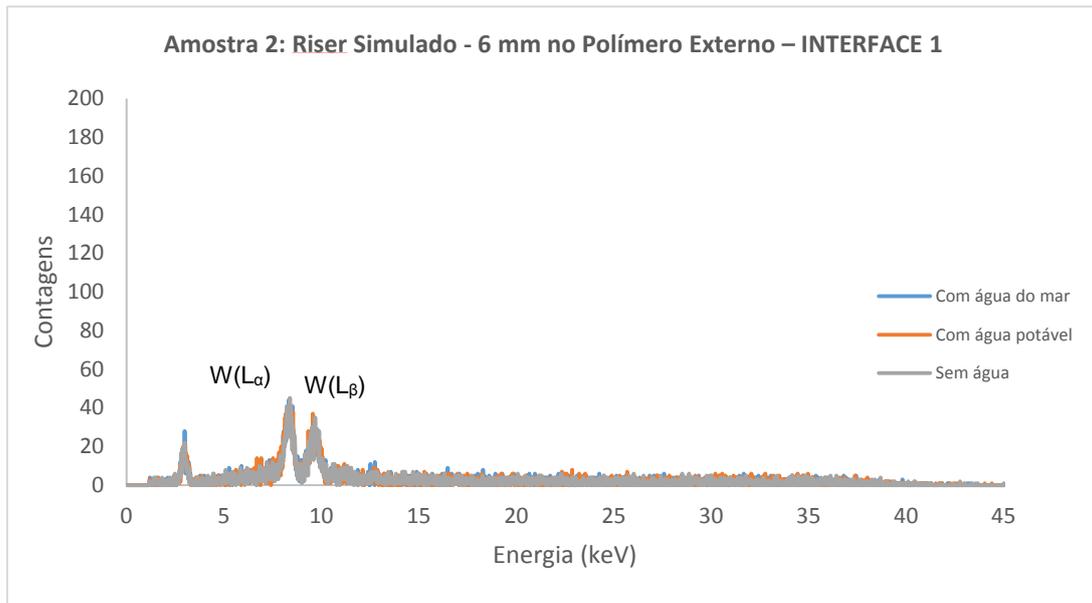


Figura IV.14 – Espectros na profundidade de 6 mm na camada polimérica externa demarcando a primeira interface

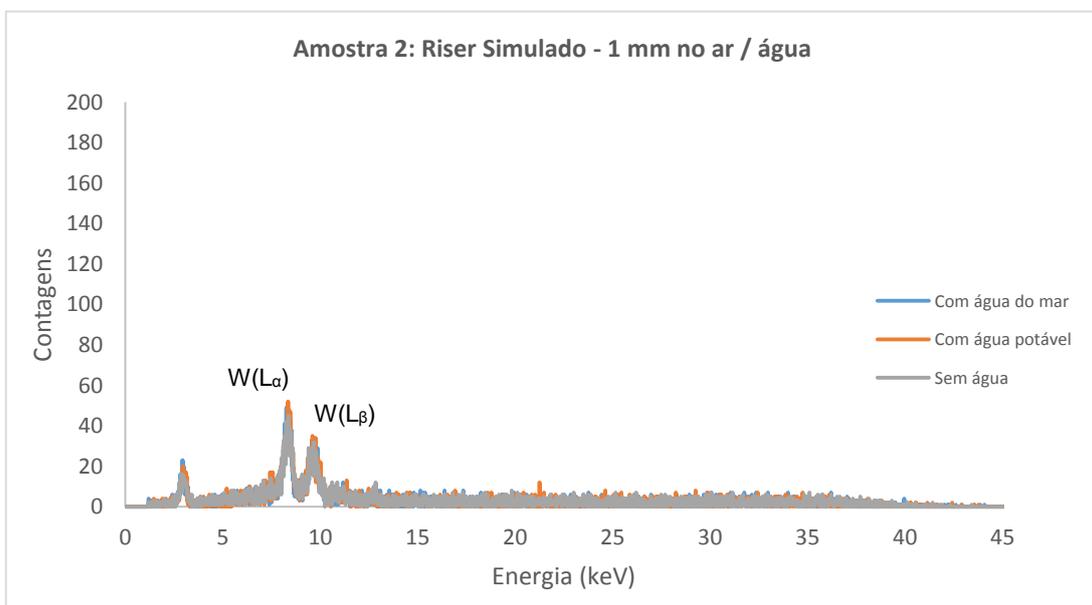


Figura IV.15 – Espectros na profundidade de 1 mm na camada de ar / água

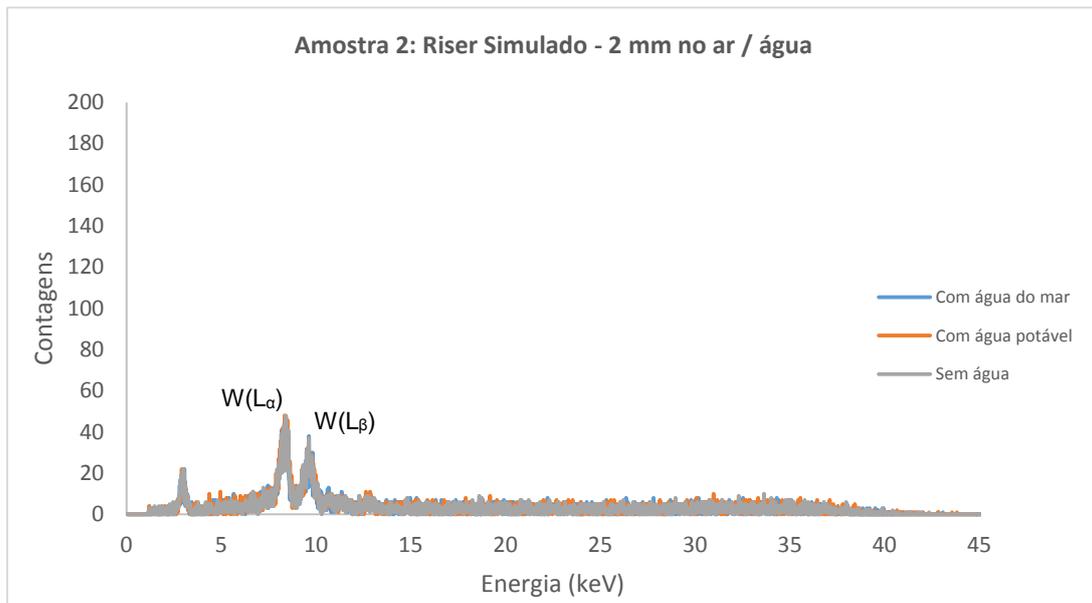


Figura IV.16 – Espectros na profundidade de 2 mm na camada de ar / água

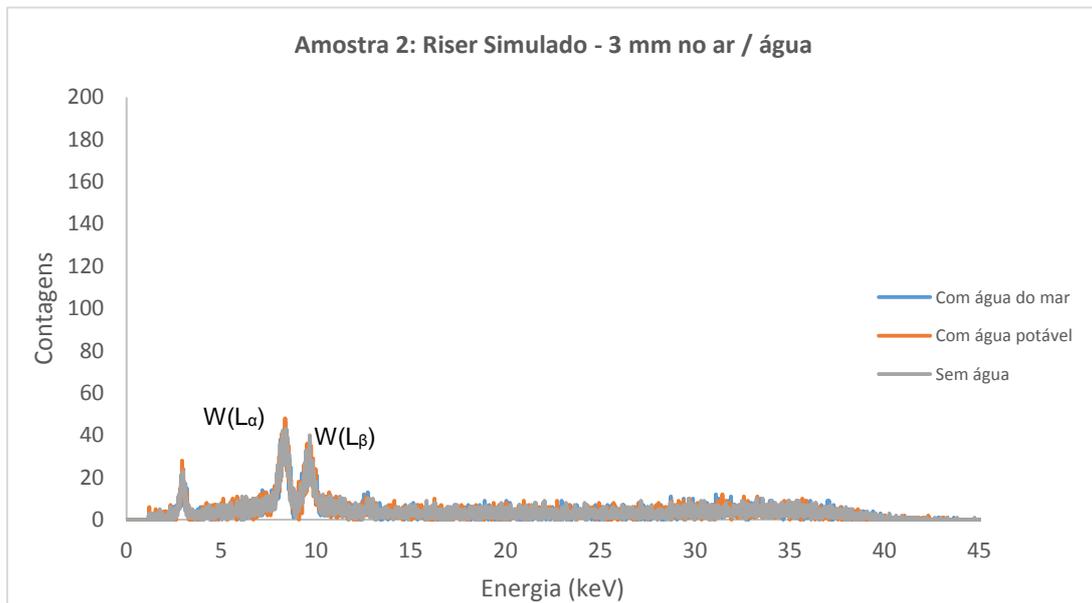


Figura IV.17 – Espectros na profundidade de 3 mm na camada de ar / água

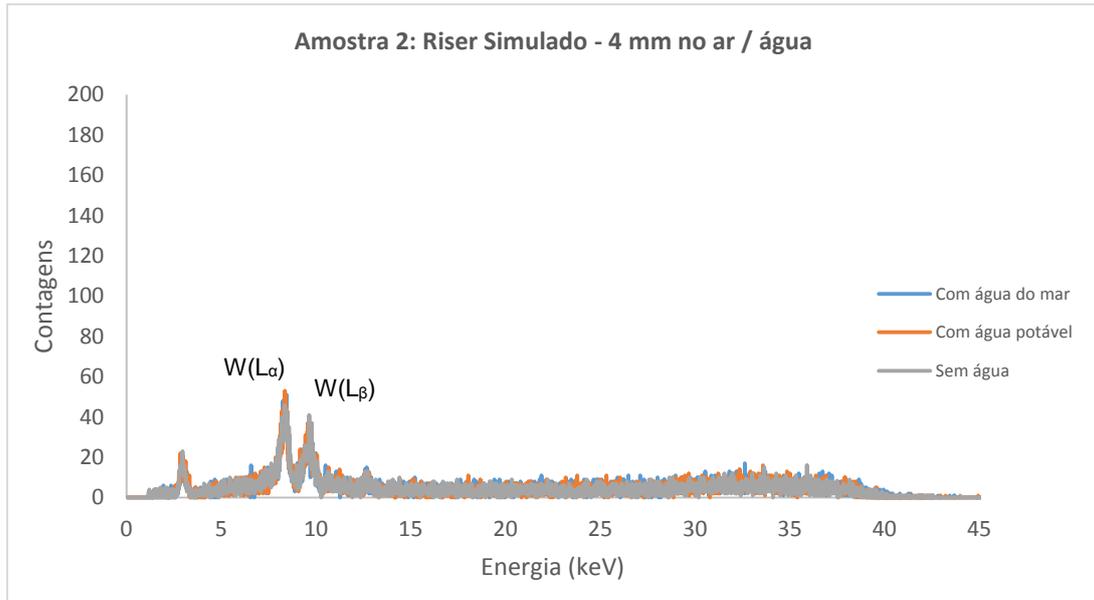


Figura IV.18 – Espectros na profundidade de 4 mm na camada de ar / água

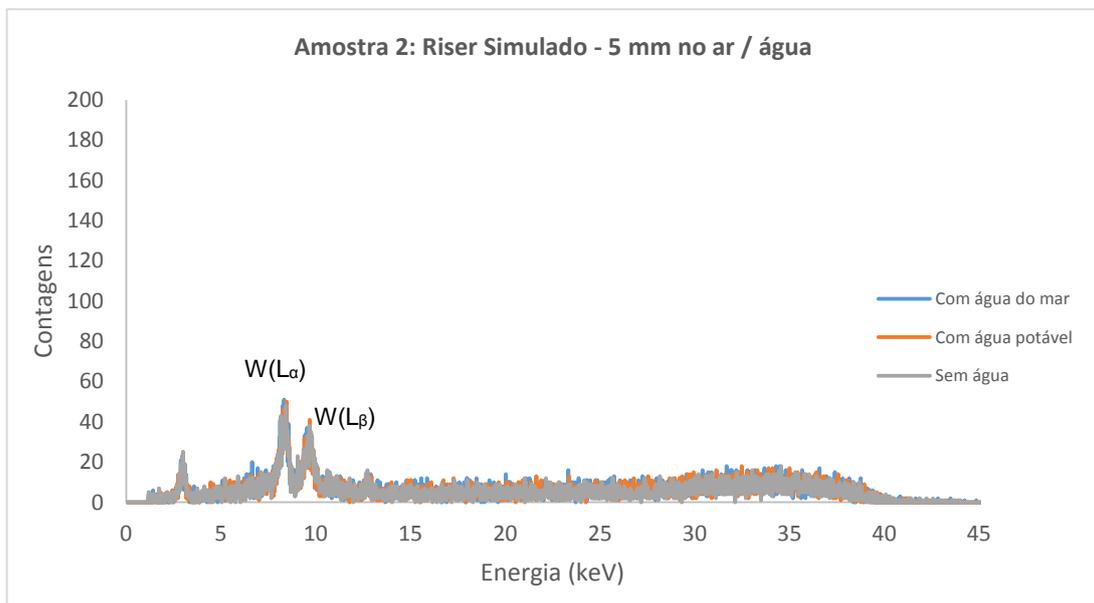


Figura IV.19 – Espectros na profundidade de 5 mm na camada de ar / água

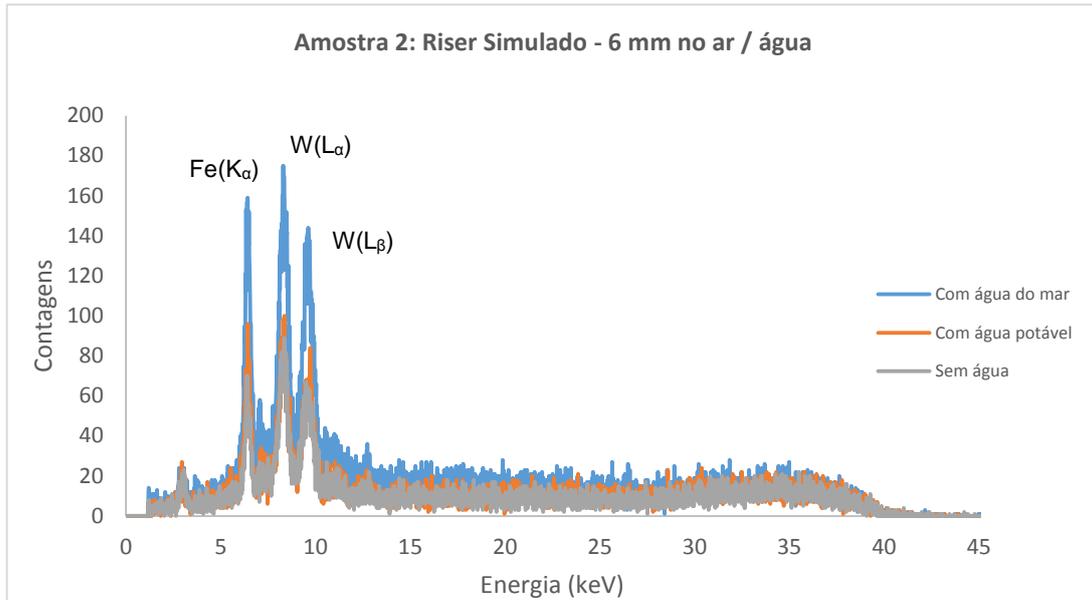


Figura IV.20 – Espectros na profundidade de 6 mm na camada de ar / água

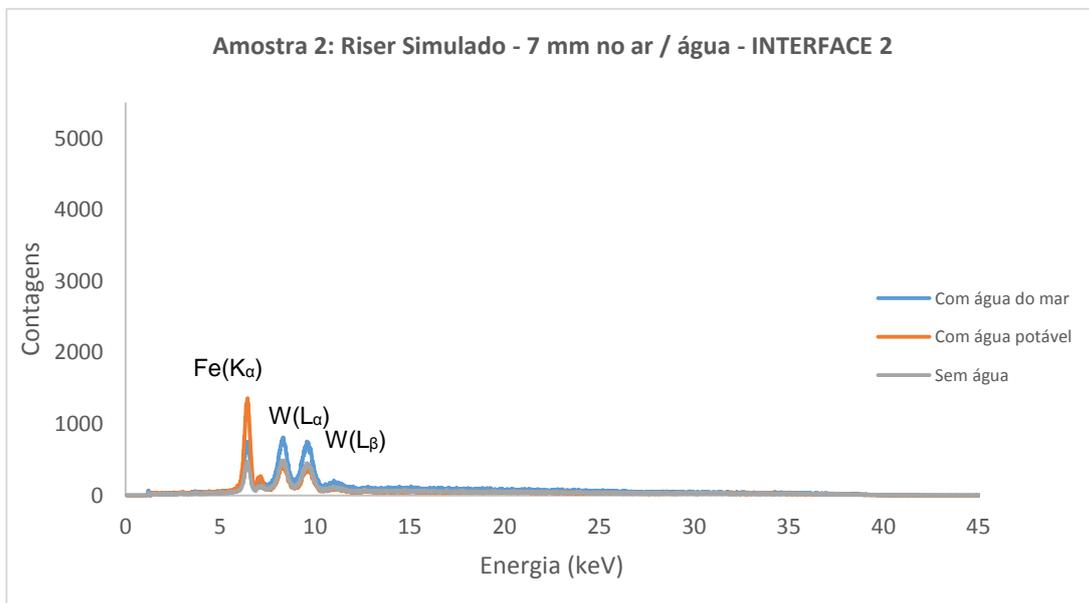


Figura IV.21 – Espectros na profundidade de 7 mm na camada de ar / água demarcando a segunda interface

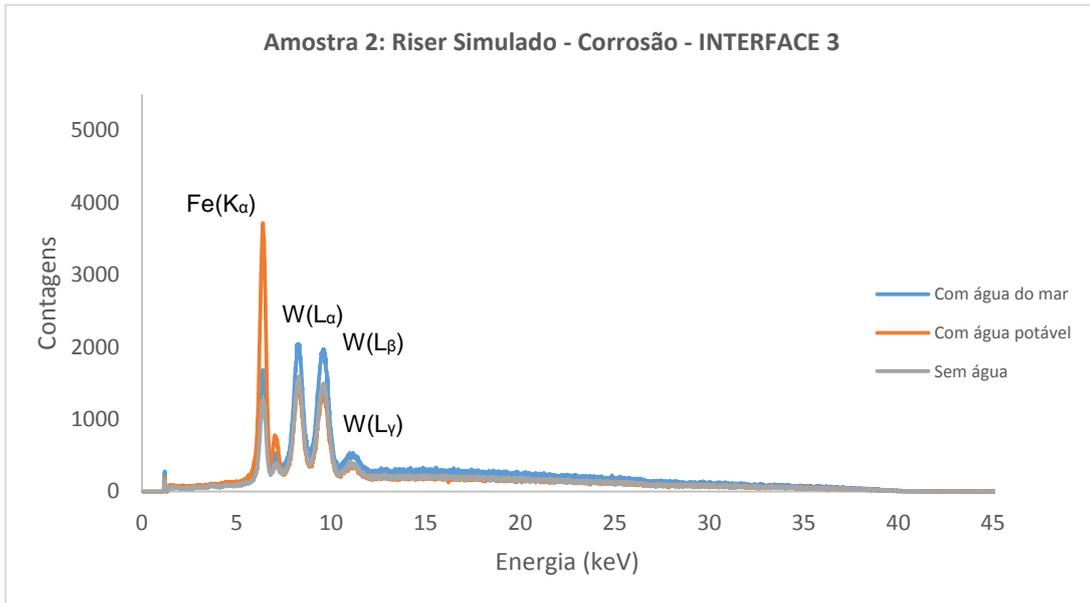


Figura IV.22 – Espectros na profundidade de 1 mm correspondente ao processo de corrosão demarcando a terceira interface

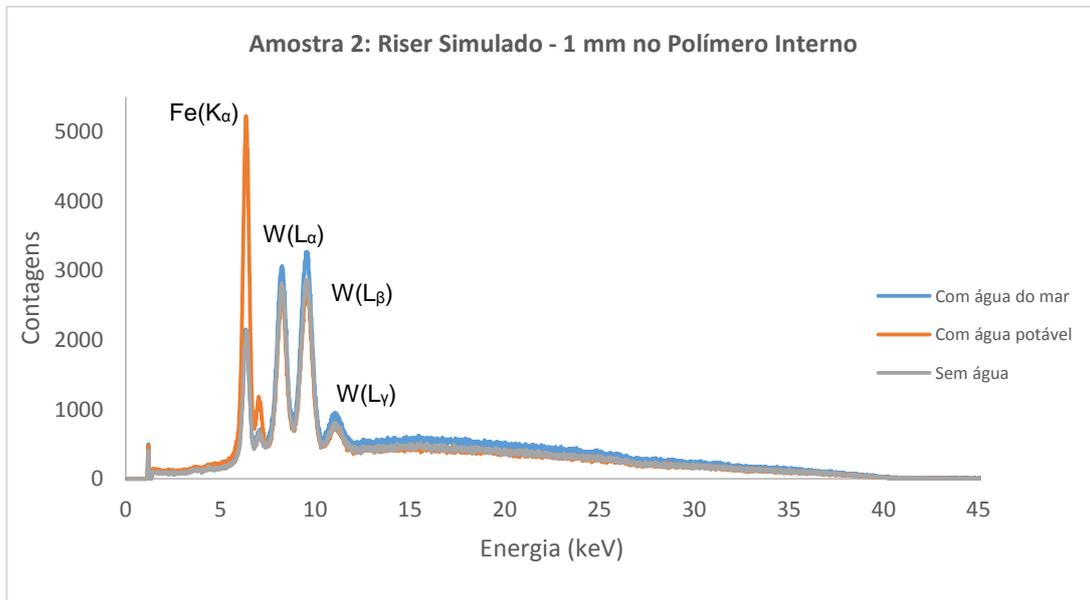


Figura IV.23 – Espectros na profundidade de 1 mm na camada Polimérica interna

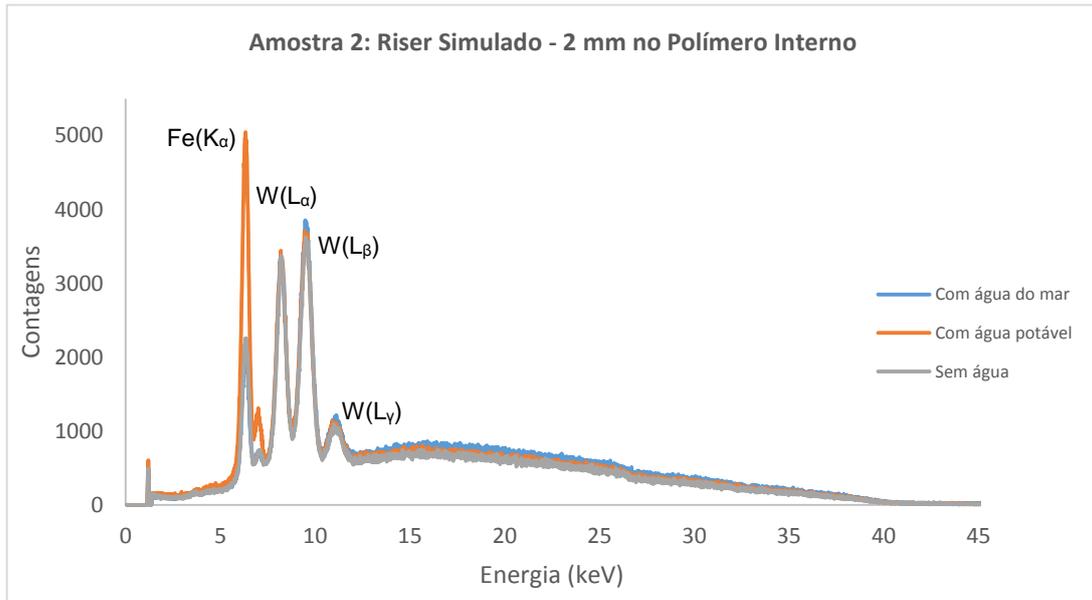


Figura IV.24 – Espectros na profundidade de 2 mm na camada Polimérica interna

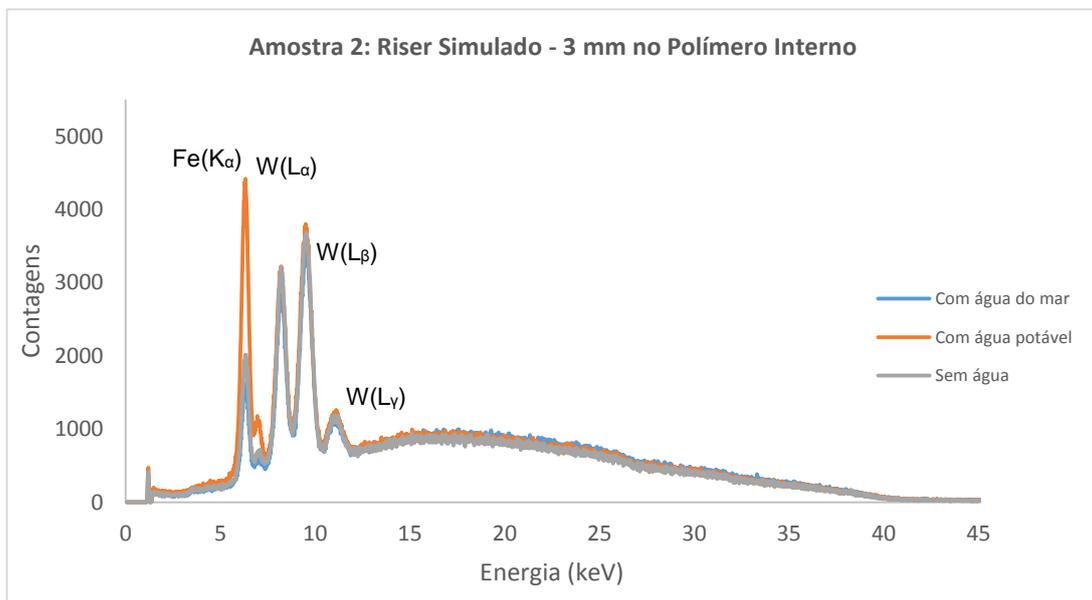


Figura IV.25 – Espectros na profundidade de 3 mm na camada Polimérica interna

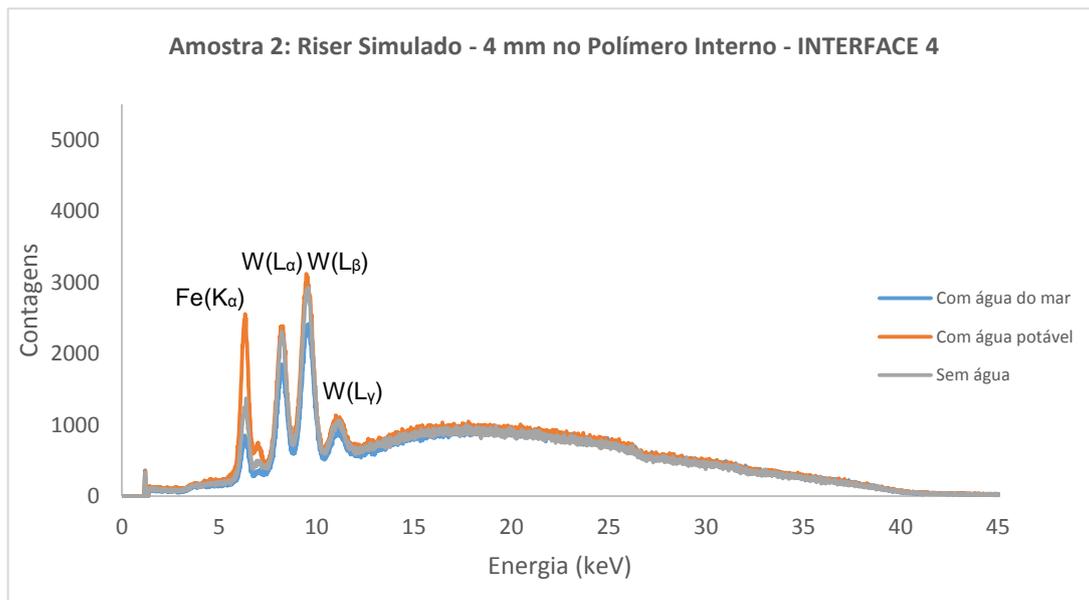


Figura IV.26 – Espectros na profundidade de 4 mm na camada Polimérica interna demarcando a quarta interface

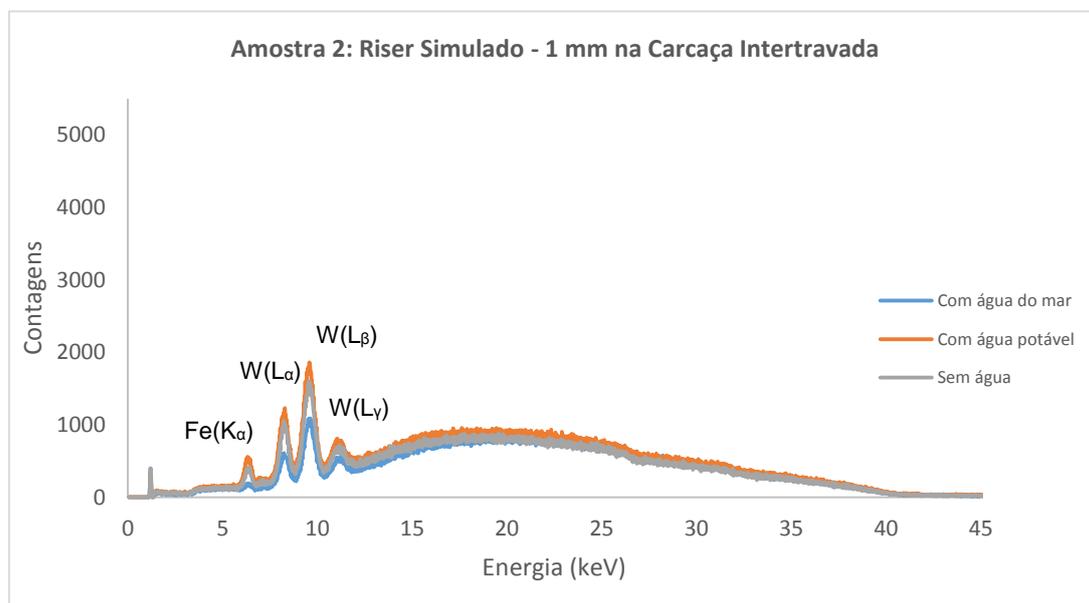


Figura IV.27 – Espectros na profundidade de 1 mm na camada Carcaça Intertravada

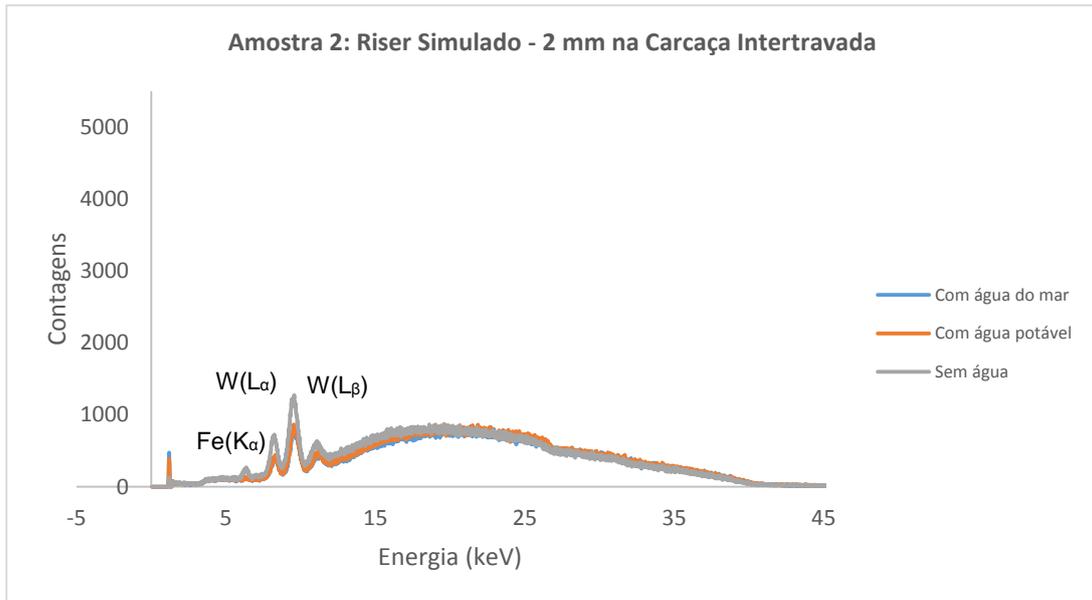


Figura IV.28 – Espectros na profundidade de 2 mm na camada Carça Intertravada

IV.3. Amostra 3: Riser Flexível

Nas figuras IV.29 a IV.45 estão demonstrados os espectros obtidos a partir da amostra 3 (riser flexível).

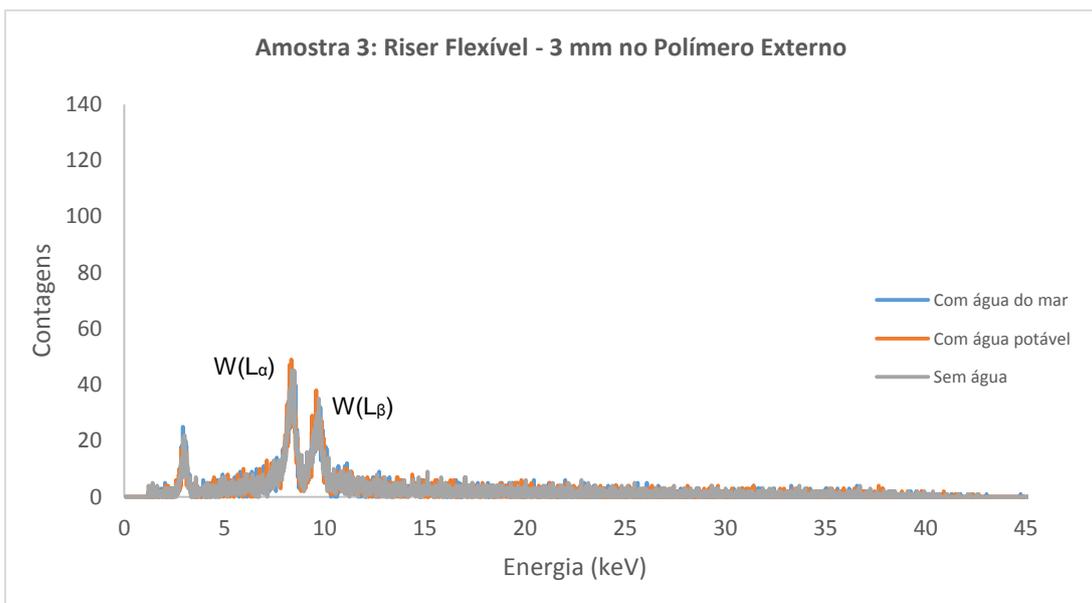


Figura IV.29 – Espectros na profundidade de 3 mm na camada Polimérica externa

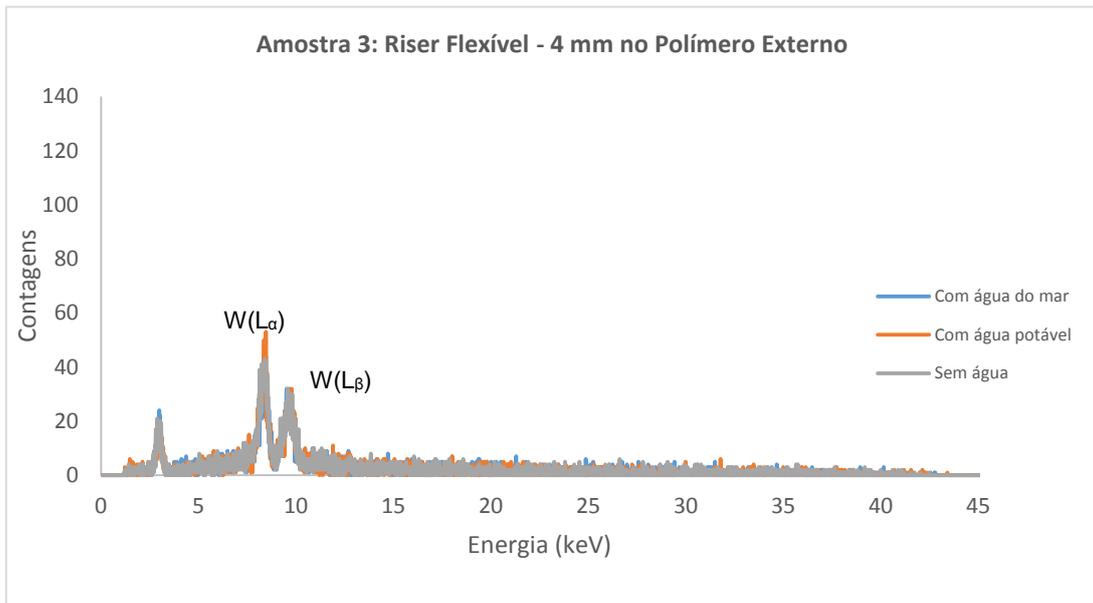


Figura IV.30 – Espectros na profundidade de 4 mm na camada Polimérica externa

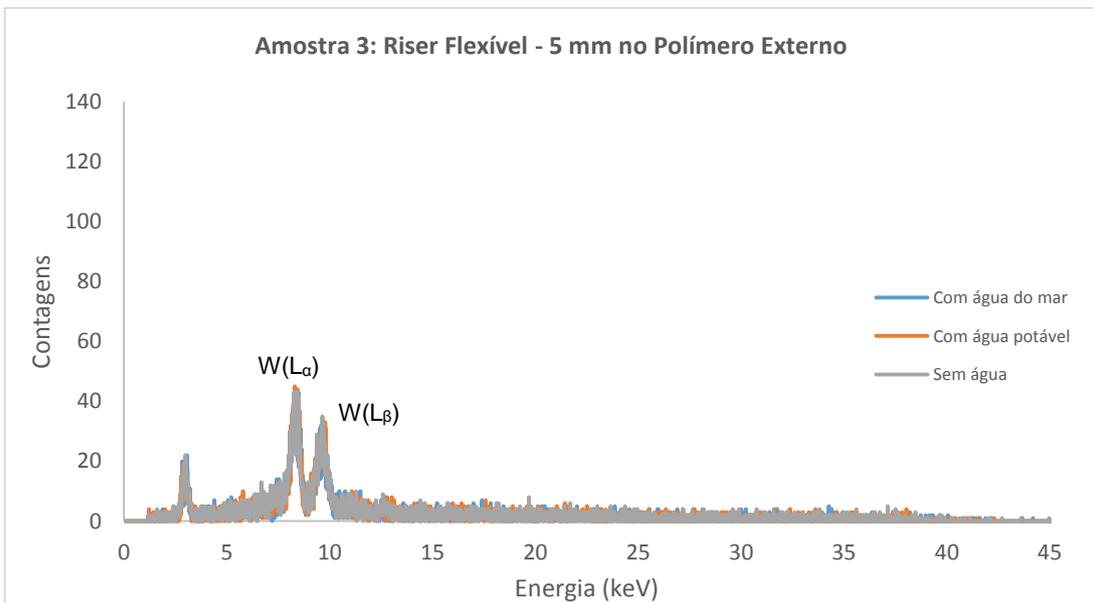


Figura IV.31 – Espectros na profundidade de 5 mm na camada Polimérica externa

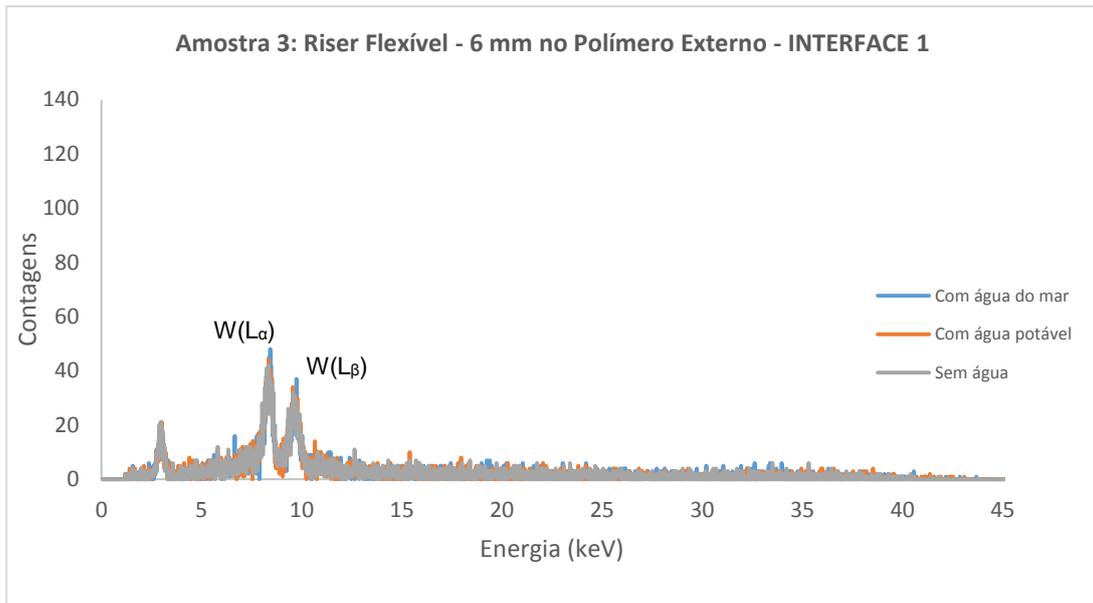


Figura IV.32 – Espectros na profundidade de 6 mm na camada Polimérica externa demarcando a primeira interface

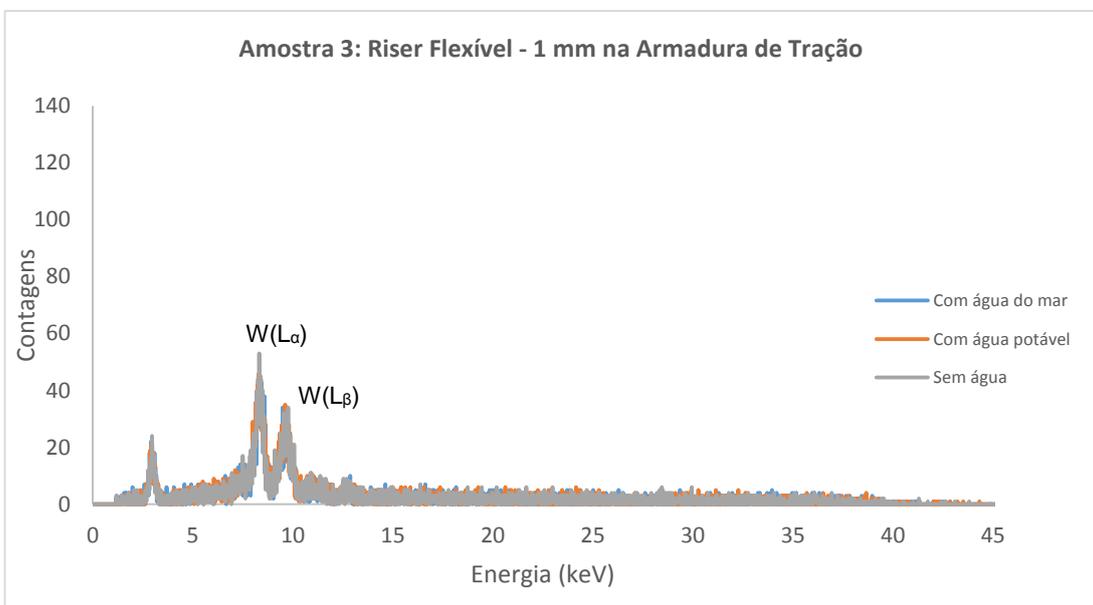


Figura IV.33 – Espectros na profundidade de 1 mm na camada Armadura de Tração

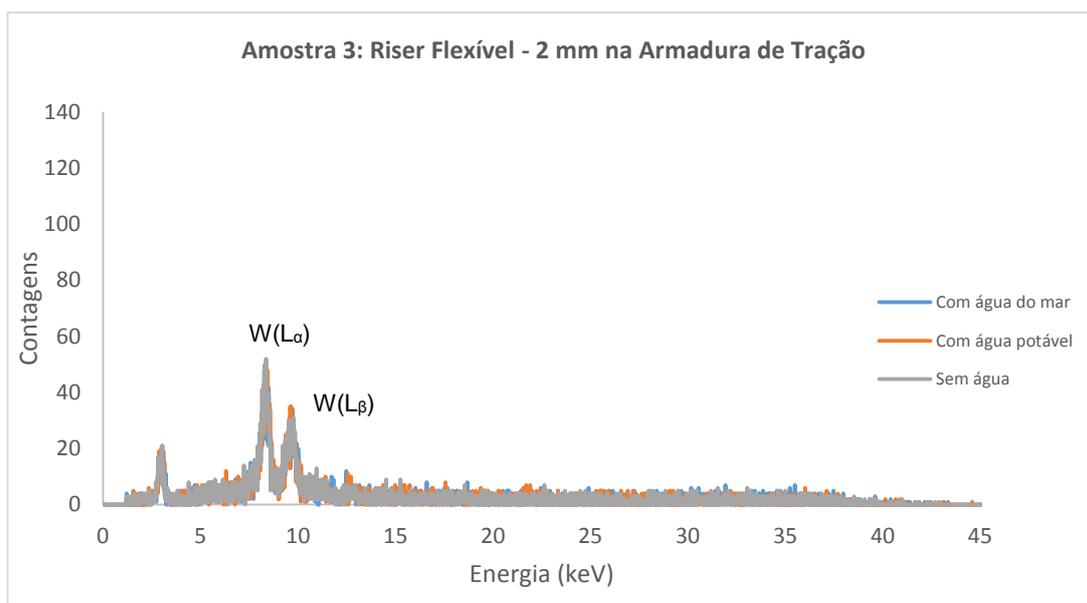


Figura IV.34 – Espectros na profundidade de 2 mm na camada Armadura de Tração

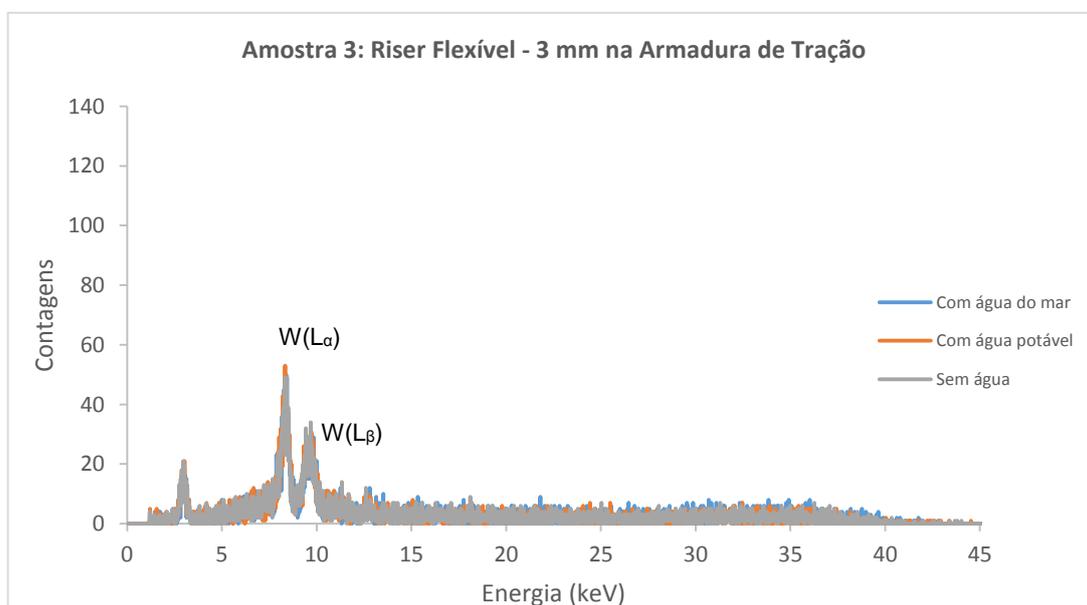


Figura IV.35 – Espectros na profundidade de 3 mm na camada Armadura de Tração

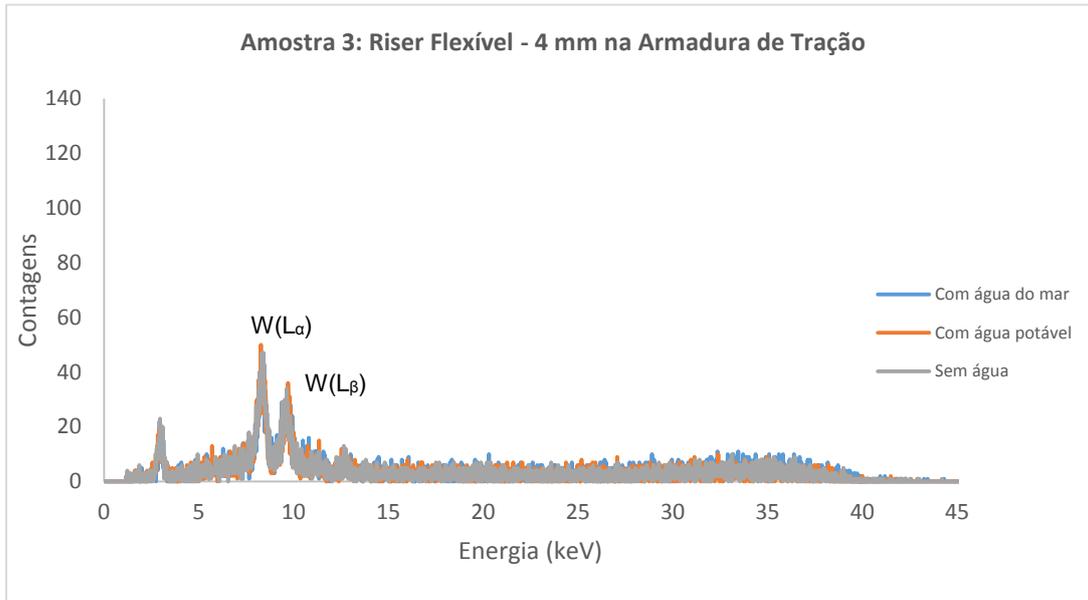


Figura IV.36 – Espectros na profundidade de 4 mm na camada Armadura de Tração

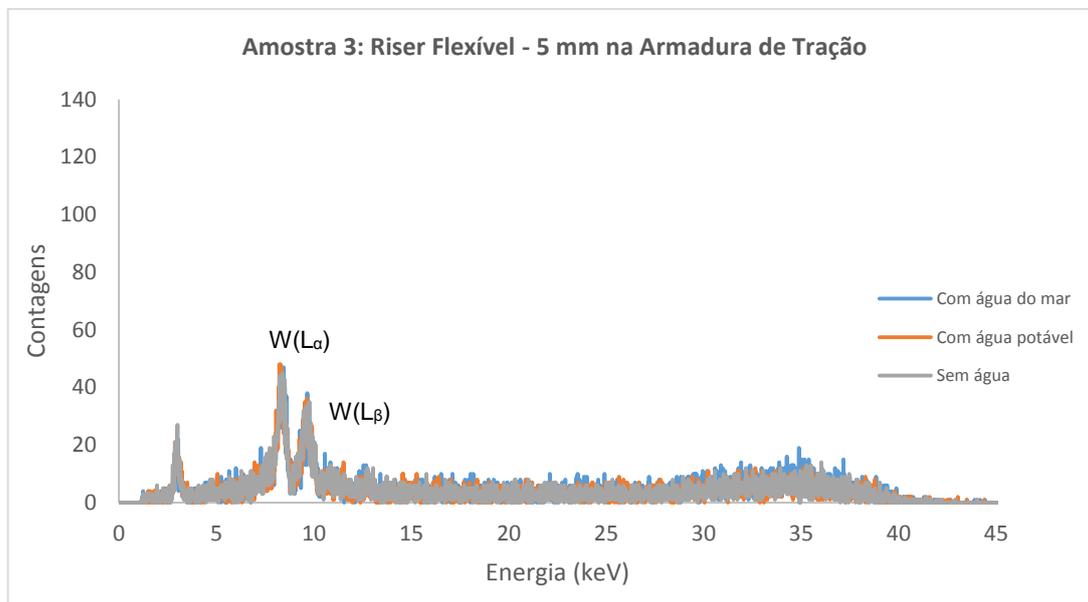


Figura IV.37 – Espectros na profundidade de 5 mm na camada Armadura de Tração

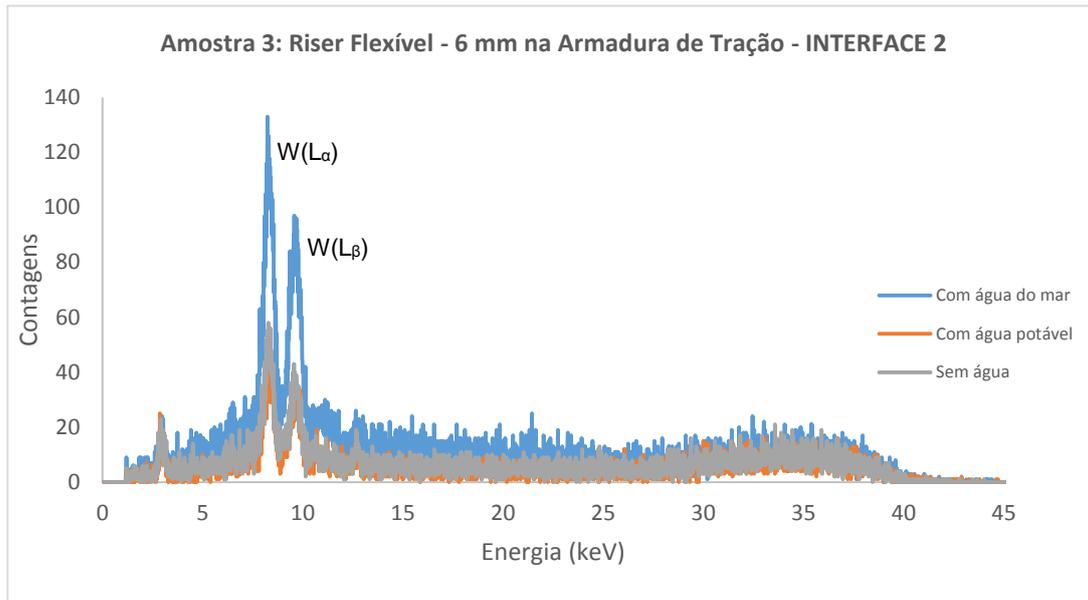


Figura IV.38 – Espectros na profundidade de 6 mm na camada Armadura de Tração demarcando a segunda interface

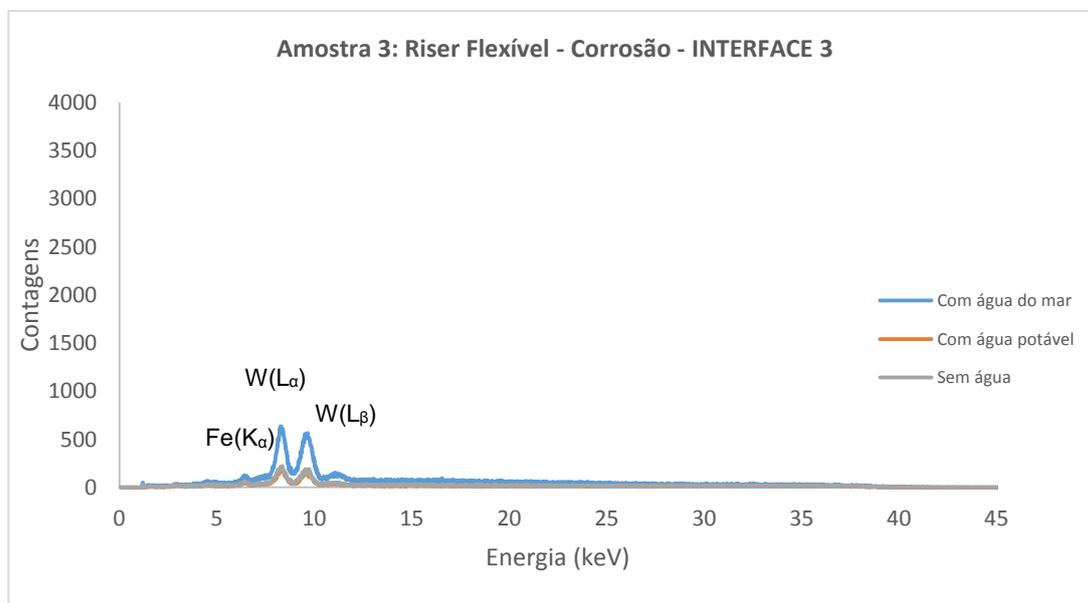


Figura IV.39 – Espectros na profundidade de 1 mm correspondente ao processo de corrosão demarcando a terceira interface

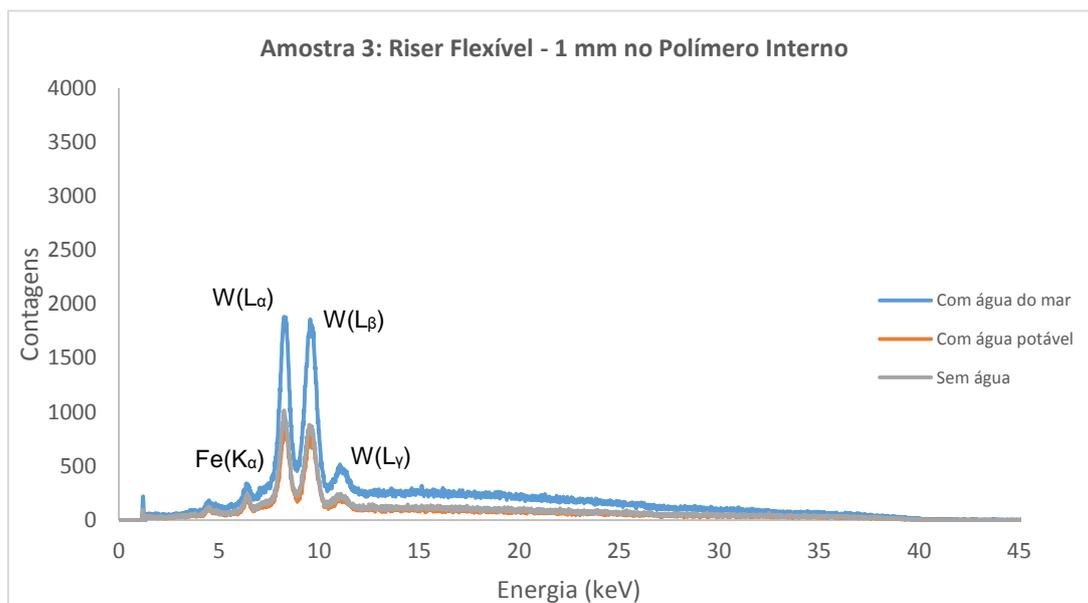


Figura IV.40 – Espectros na profundidade de 1 mm na camada Polimérica interna

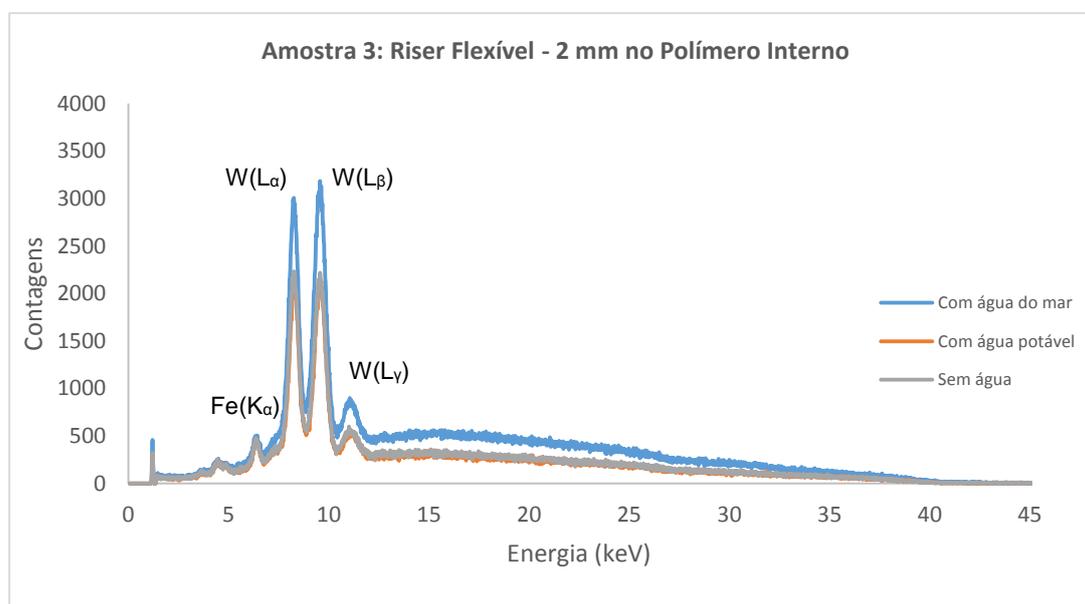


Figura IV.41 – Espectros na profundidade de 2 mm na camada Polimérica interna

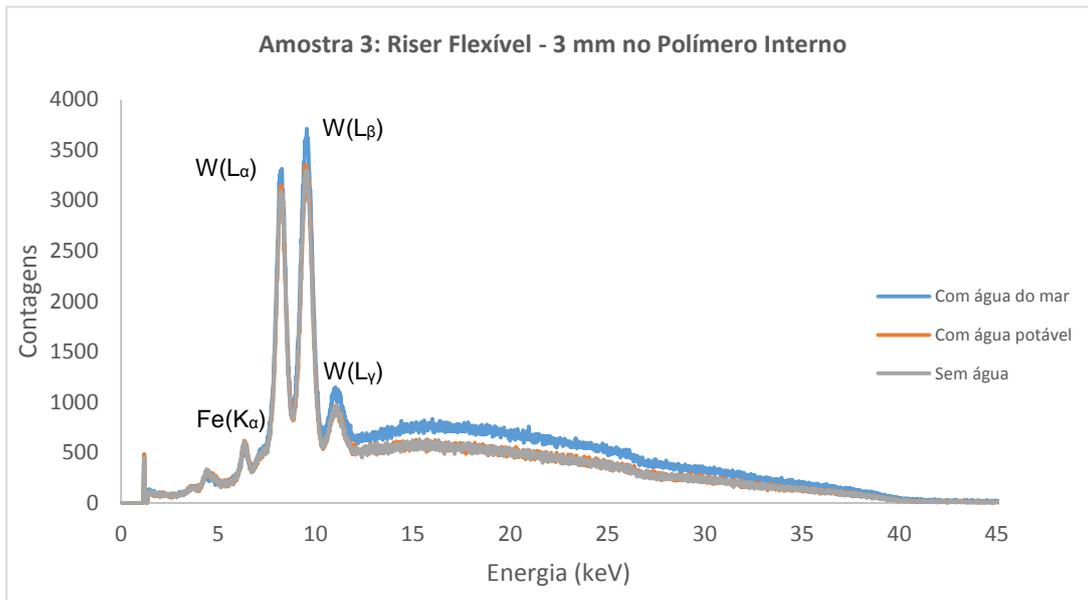


Figura IV.42 – Espectros na profundidade de 3 mm na camada Polimérica interna

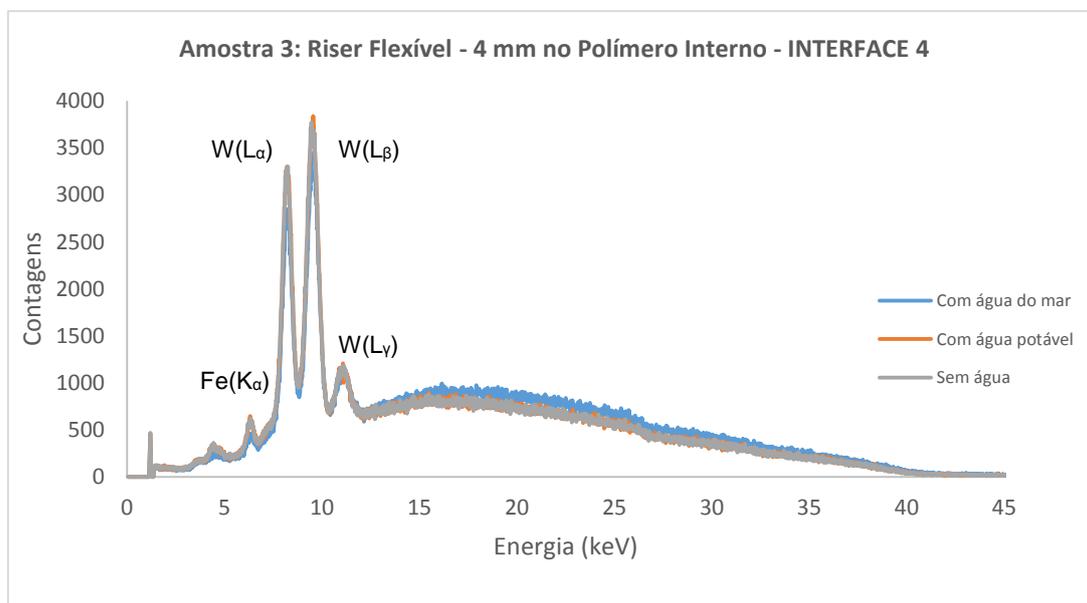


Figura IV.43 – Espectros na profundidade de 4 mm na camada Polimérica interna demarcando a quarta interface

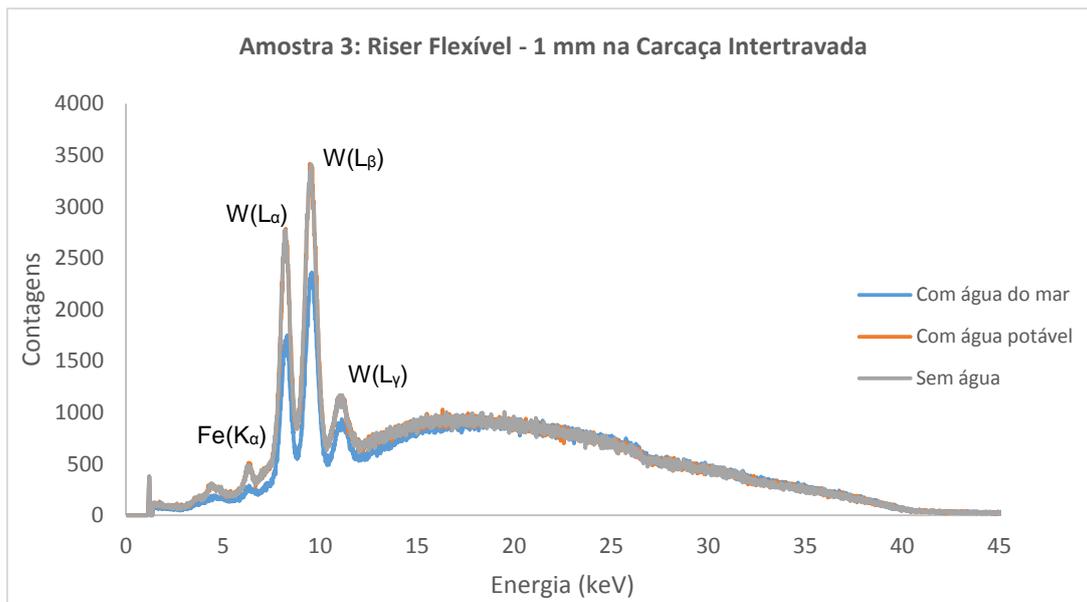


Figura IV.44 – Espectros na profundidade de 1 mm na camada Carcaça Intertravada

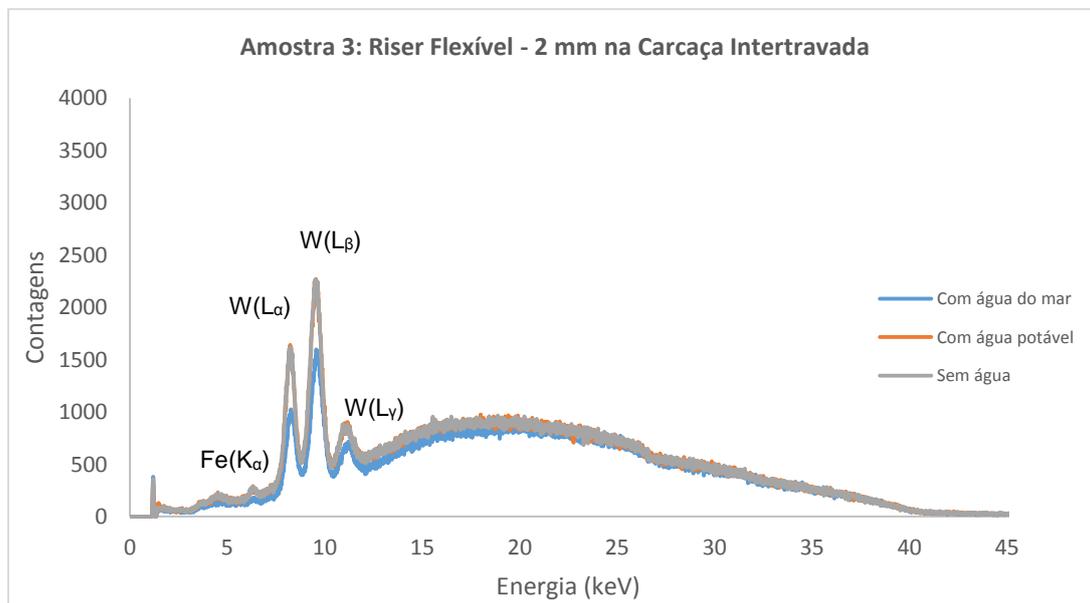


Figura IV.45 – Espectros na profundidade de 2 mm na camada Carcaça Intertravada

IV.4. Amostra 3: Riser Flexível – Após alteração do tamanho do volume de inspeção

Conforme descrito no capítulo III, foi realizada uma mudança no arranjo experimental que ocasionou o aumento do volume de inspeção. O voxel passou a ter a configuração descrita na figura IV.46. Esta nova configuração permitiu que o tubo fosse varrido em maior profundidade.

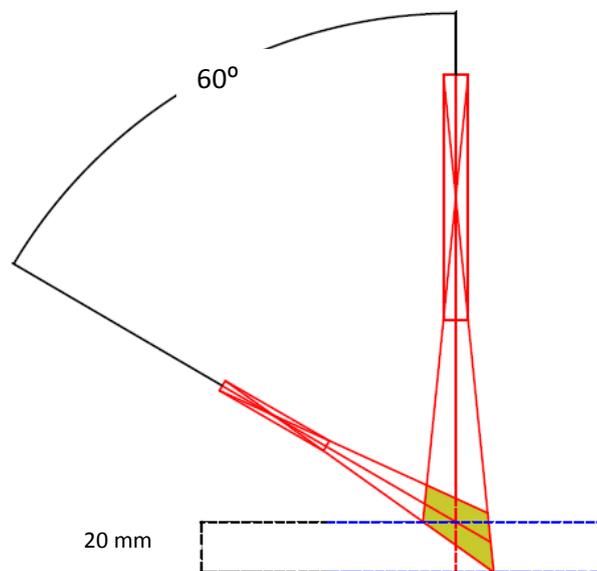


Figura IV.46 – Tamanho do volume de inspeção após alteração do arranjo experimental

Foram realizadas novas varreduras, de 1mm cada, desta vez iniciando na superfície do tubo para as condições sem água, com água potável e com água do mar.

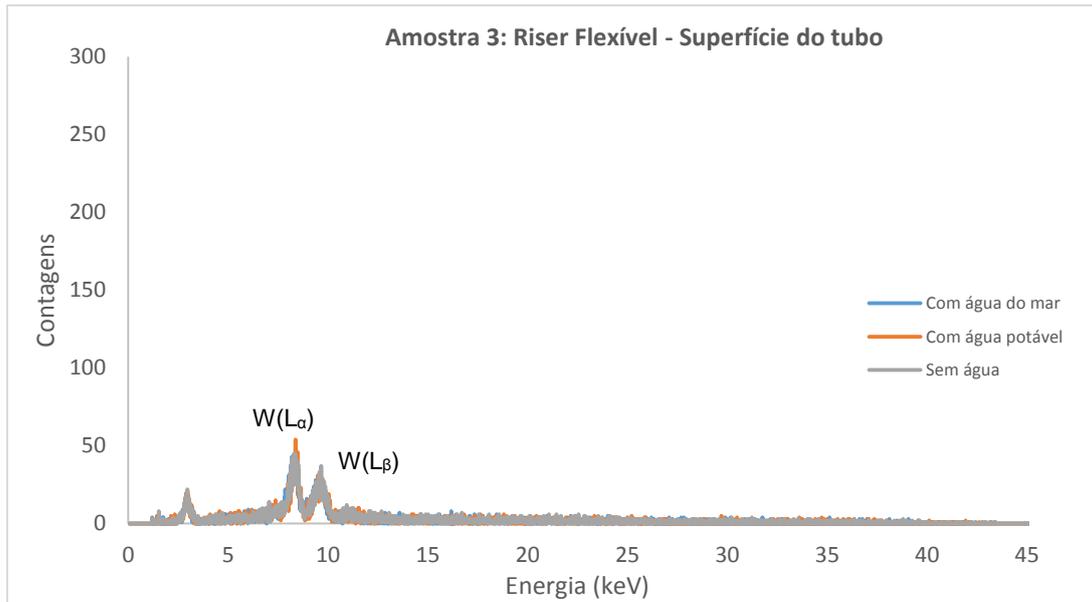


Figura IV.47 – Espectros obtidos na superfície do tubo

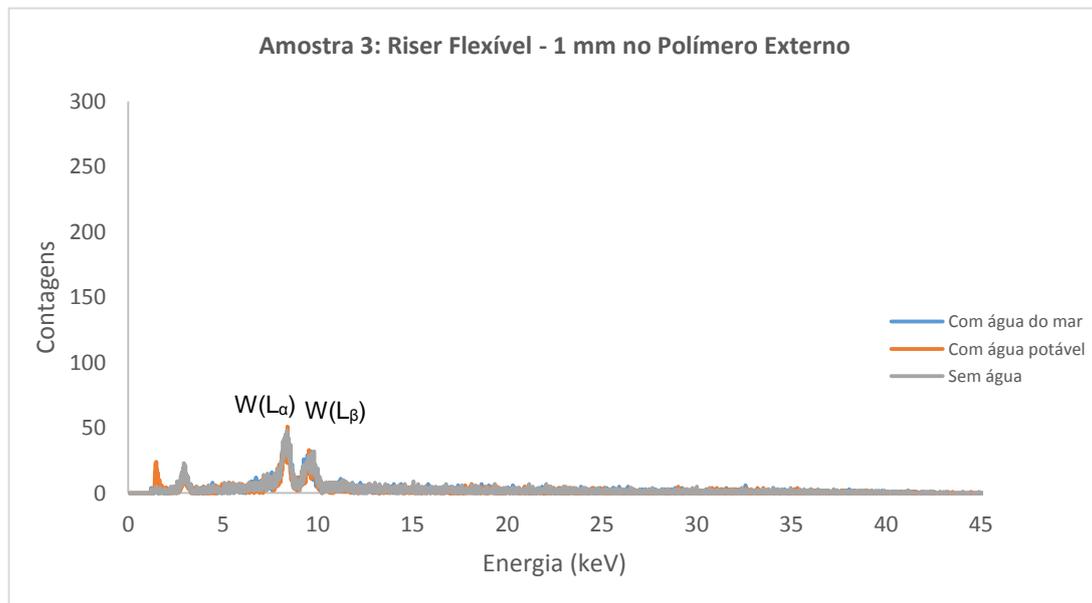


Figura IV.48 – Espectros na profundidade de 1 mm na camada Polimérica externa

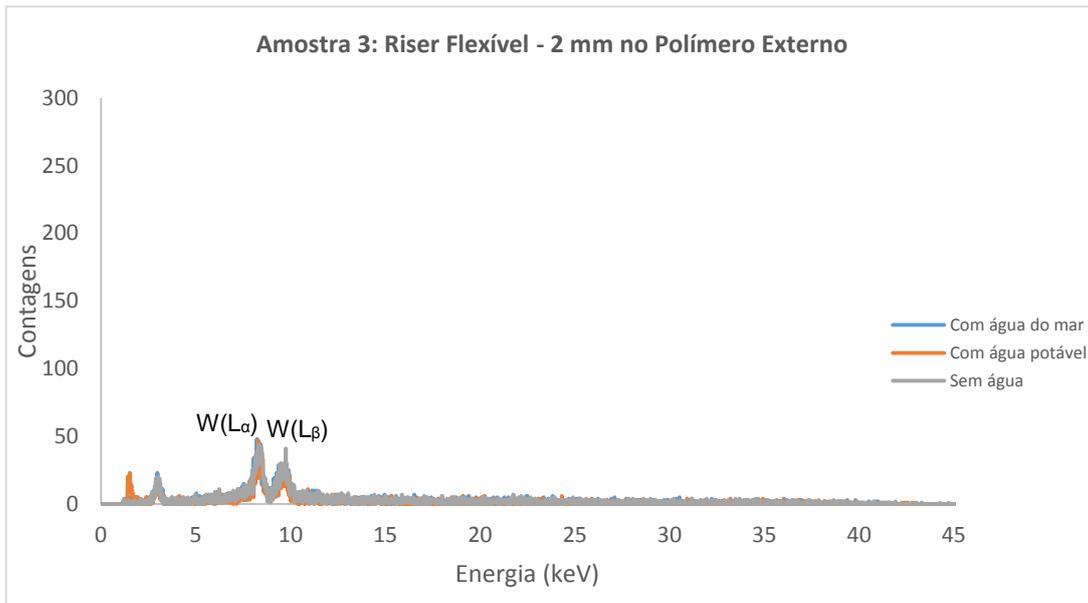


Figura IV.49 – Espectros na profundidade de 2 mm na camada Polimérica externa

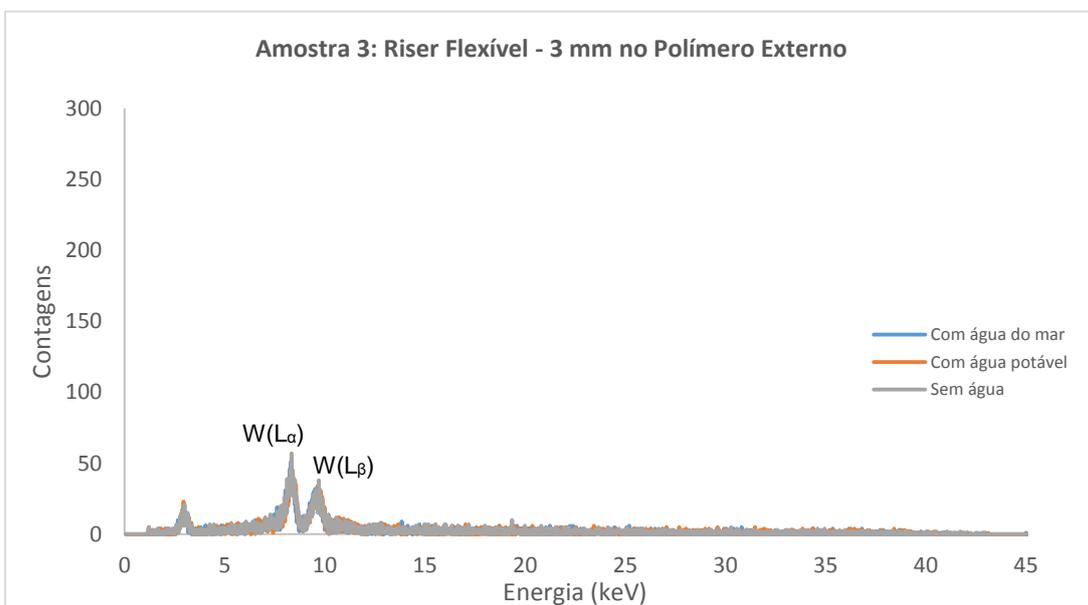


Figura IV.50 – Espectros na profundidade de 3 mm na camada Polimérica externa

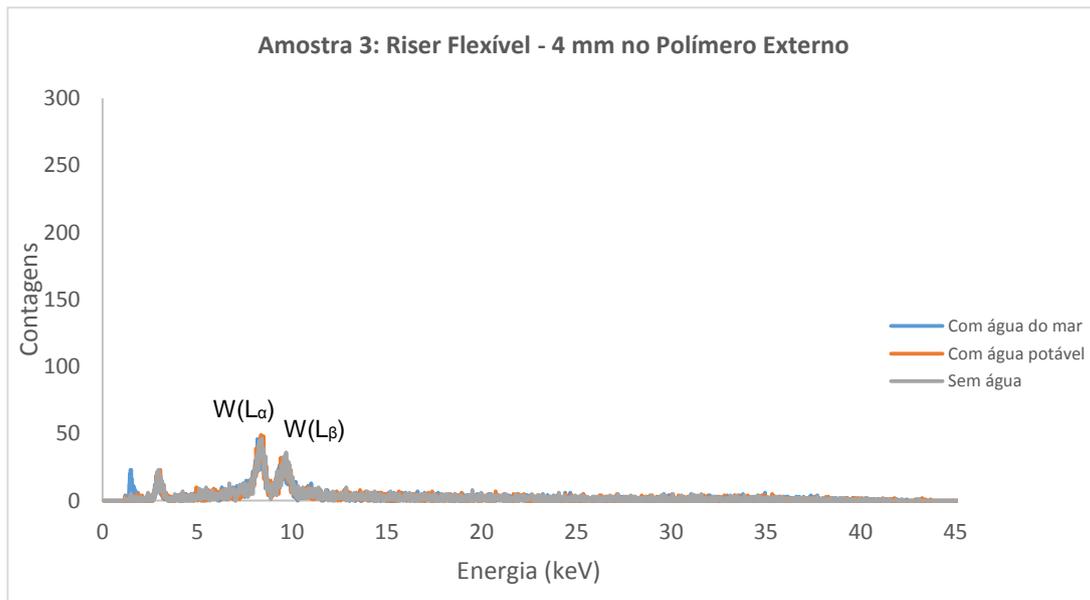


Figura IV.51 – Espectros na profundidade de 4 mm na camada Polimérica externa

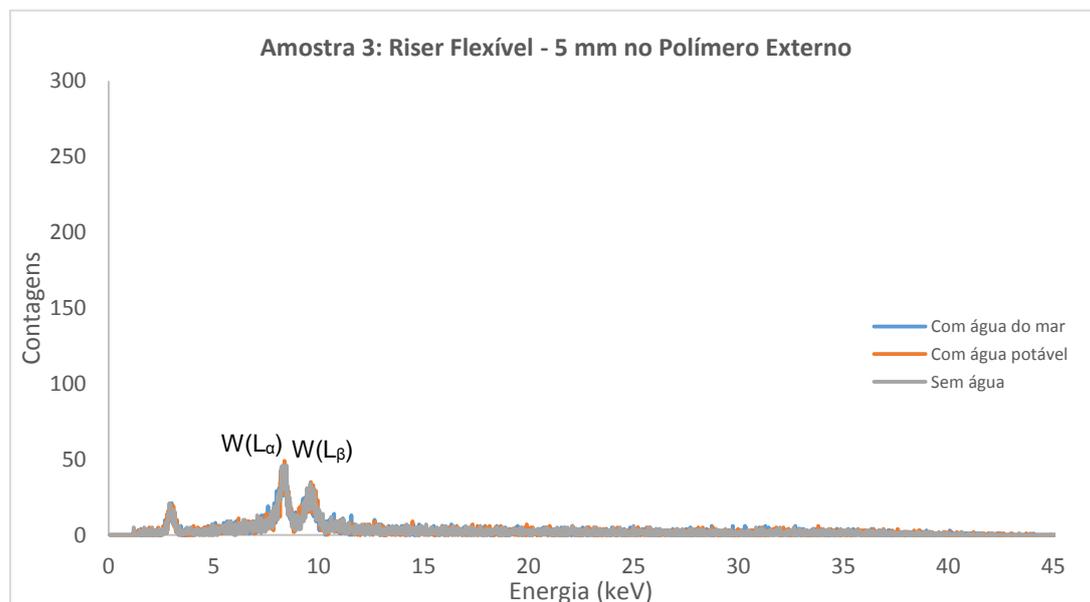


Figura IV.52 – Espectros na profundidade de 5 mm na camada Polimérica externa

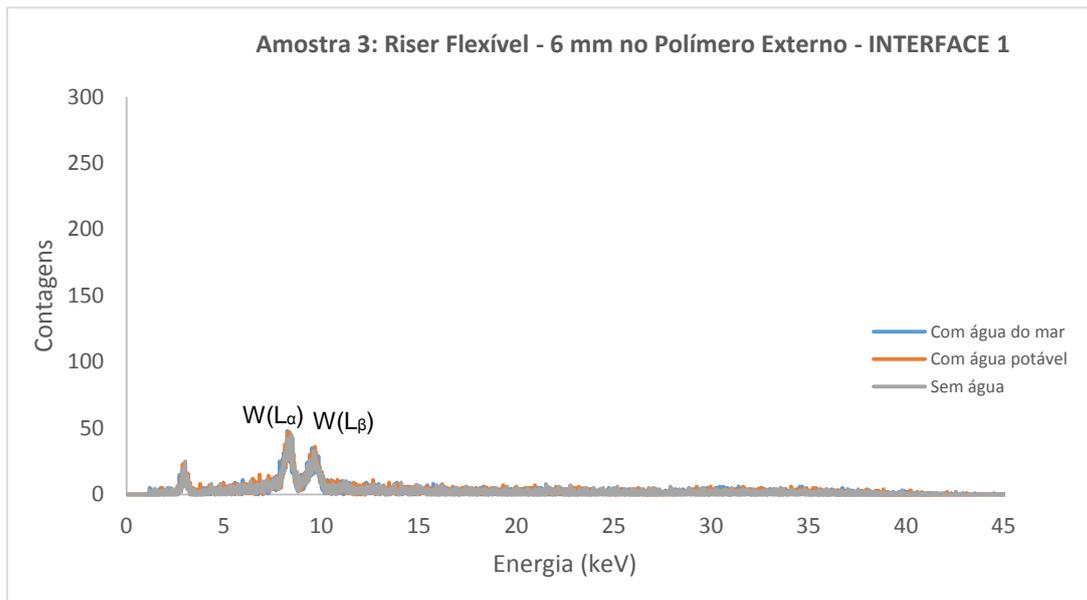


Figura IV.53 – Espectros na profundidade de 6 mm na camada Polimérica externa demarcando a primeira interface

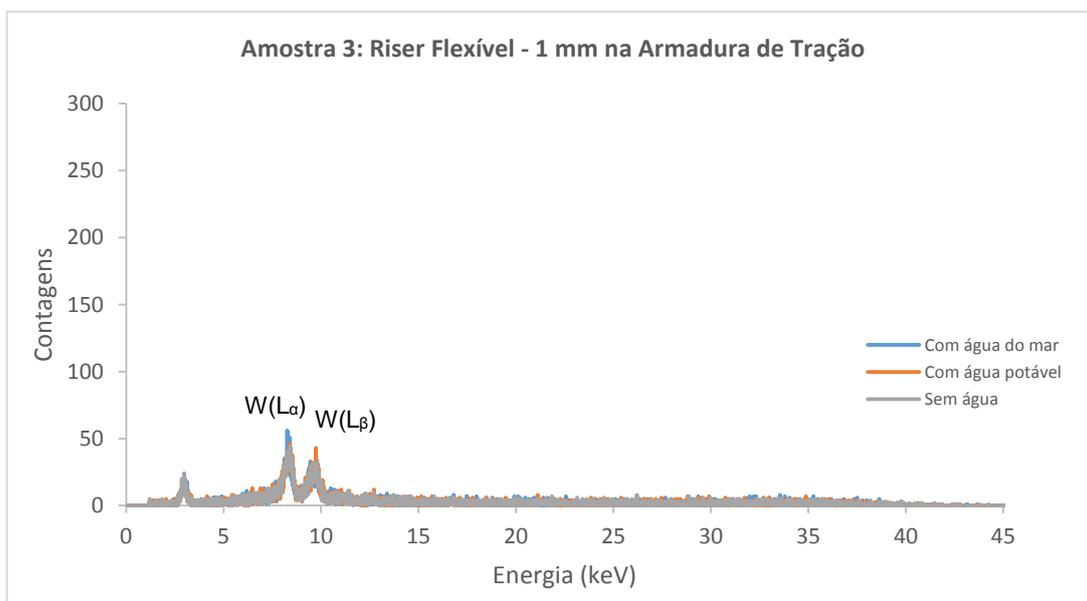


Figura IV.54 – Espectros na profundidade de 1 mm na camada Armadura de Tração

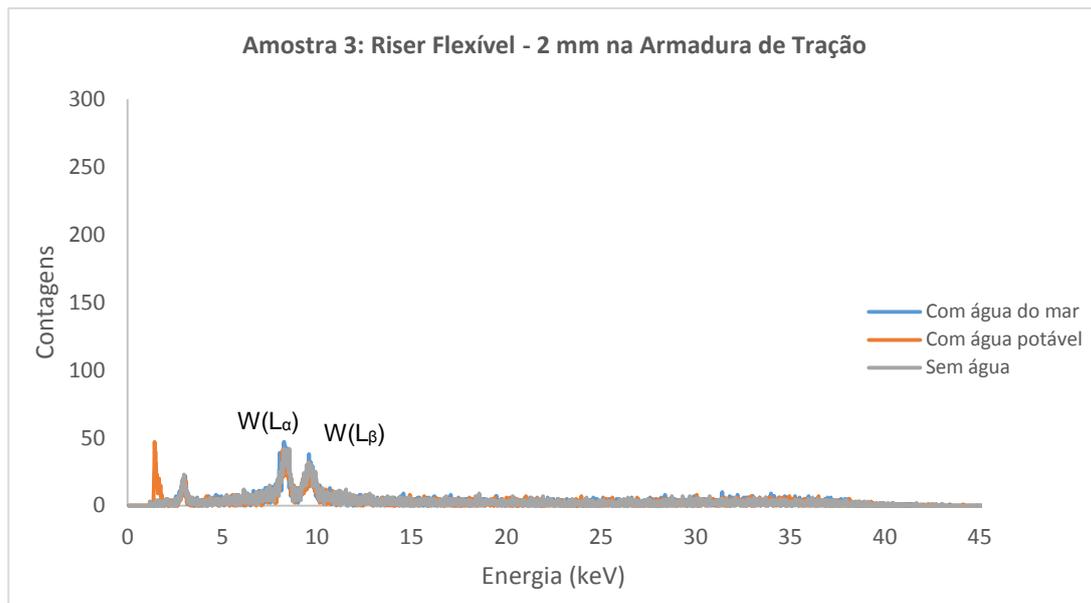


Figura IV.55 – Espectros na profundidade de 2 mm na camada Armadura de Tração

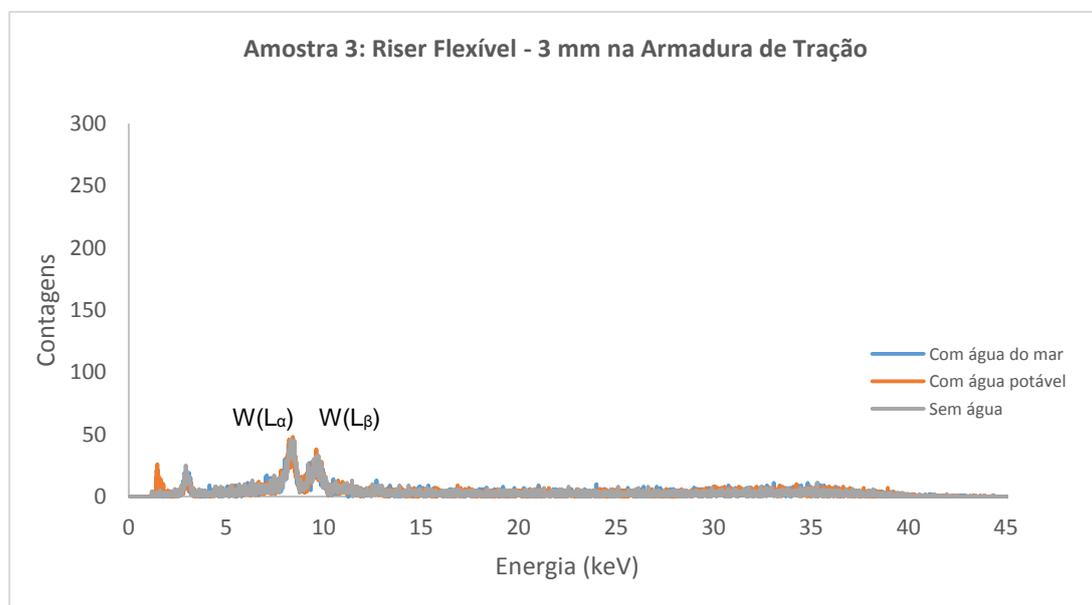


Figura IV.56 – Espectros na profundidade de 3 mm na camada Armadura de Tração

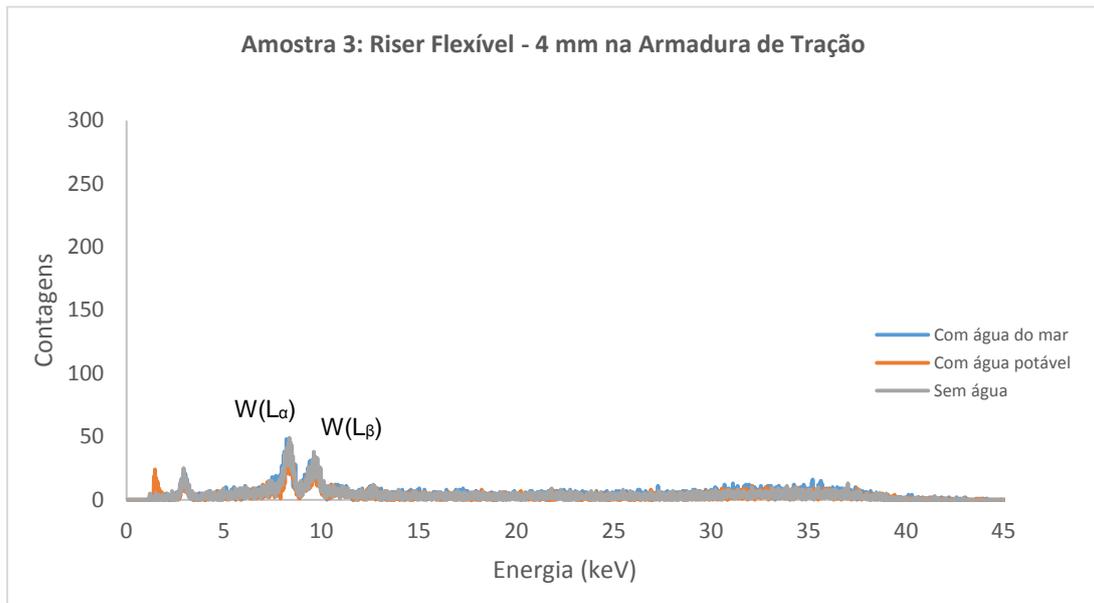


Figura IV.57 – Espectros na profundidade de 4 mm na camada Armadura de Tração

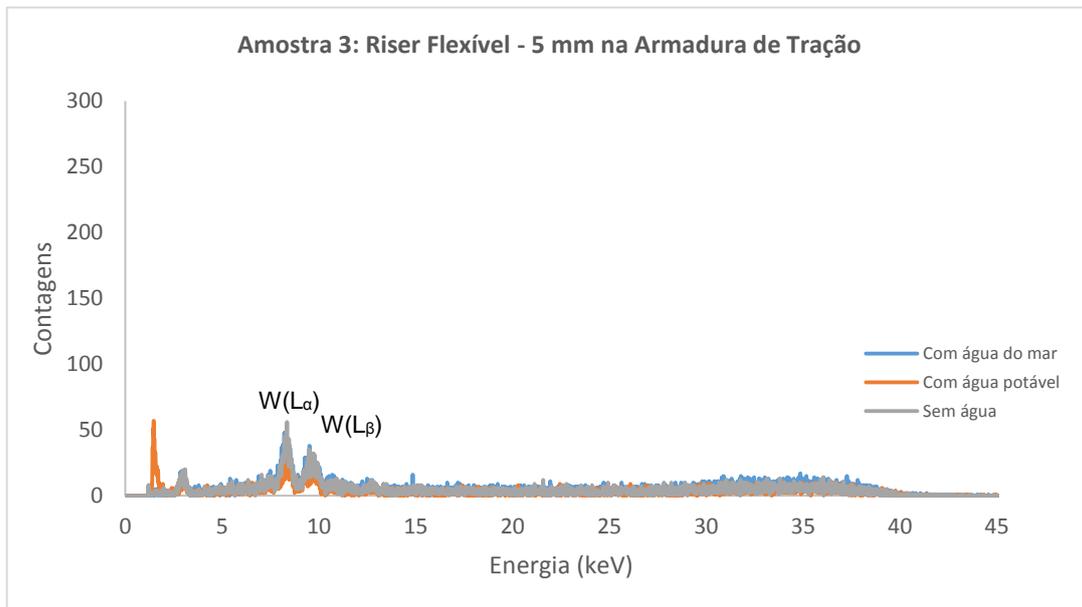


Figura IV.58 – Espectros na profundidade de 5 mm na camada Armadura de Tração

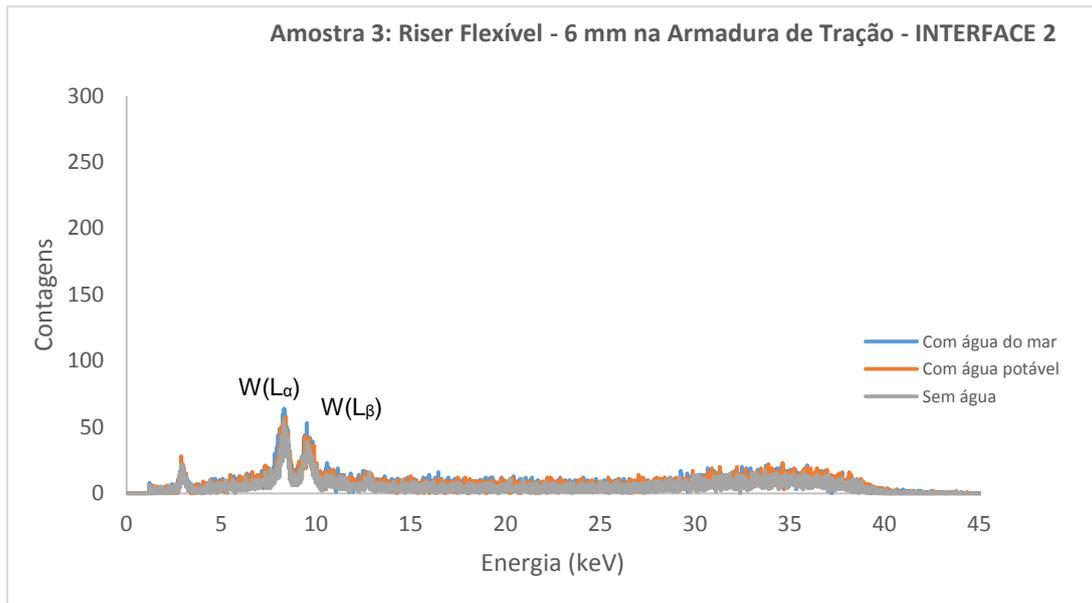


Figura IV.59 – Espectros na profundidade de 6 mm na camada Armadura de Tração demarcando a segunda interface

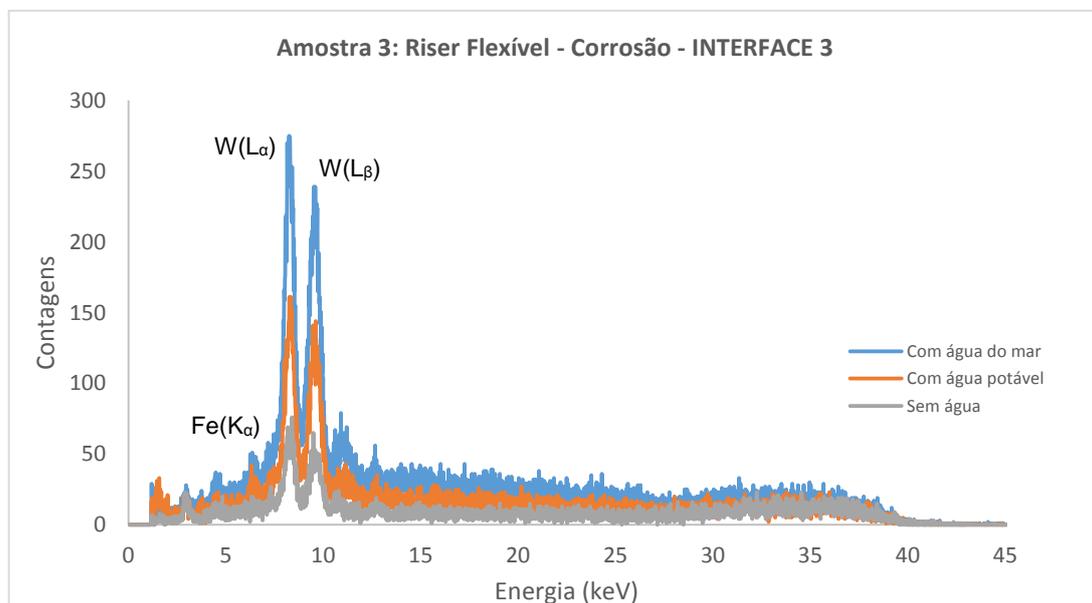


Figura IV.60 – Espectros na profundidade de 1 mm correspondente ao processo de corrosão demarcando a terceira interface

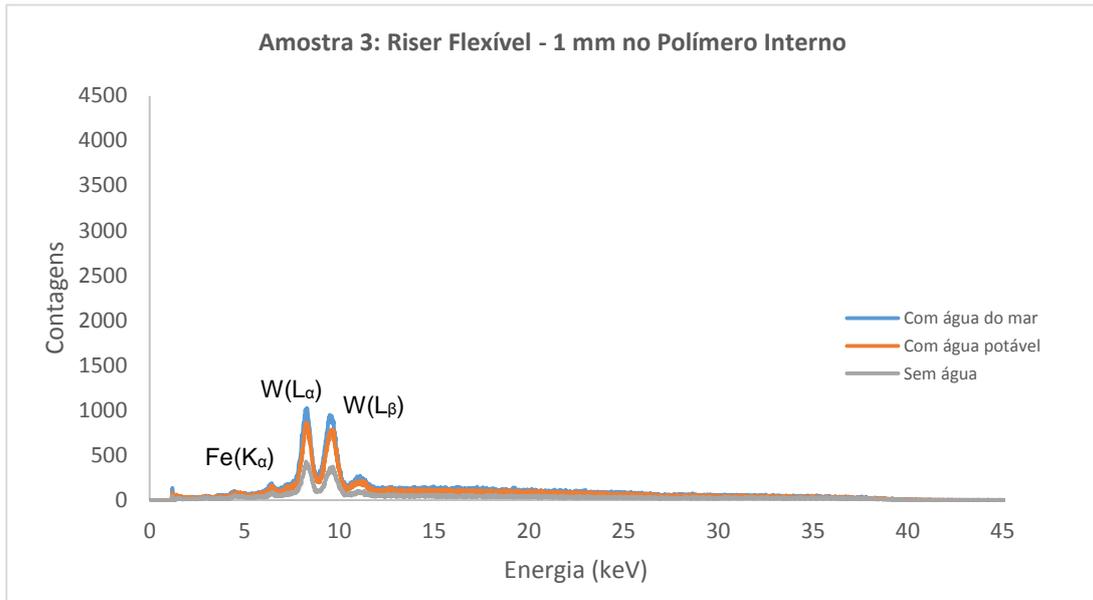


Figura IV.61 – Espectros na profundidade de 1 mm na camada Polimérica interna

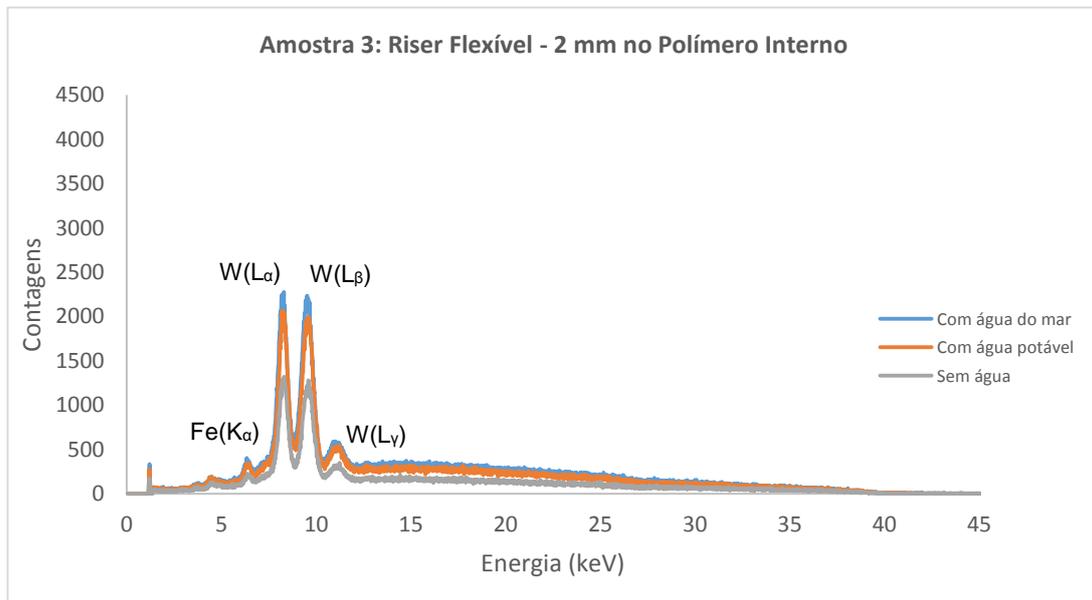


Figura IV.62 – Espectros na profundidade de 2 mm na camada Polimérica interna

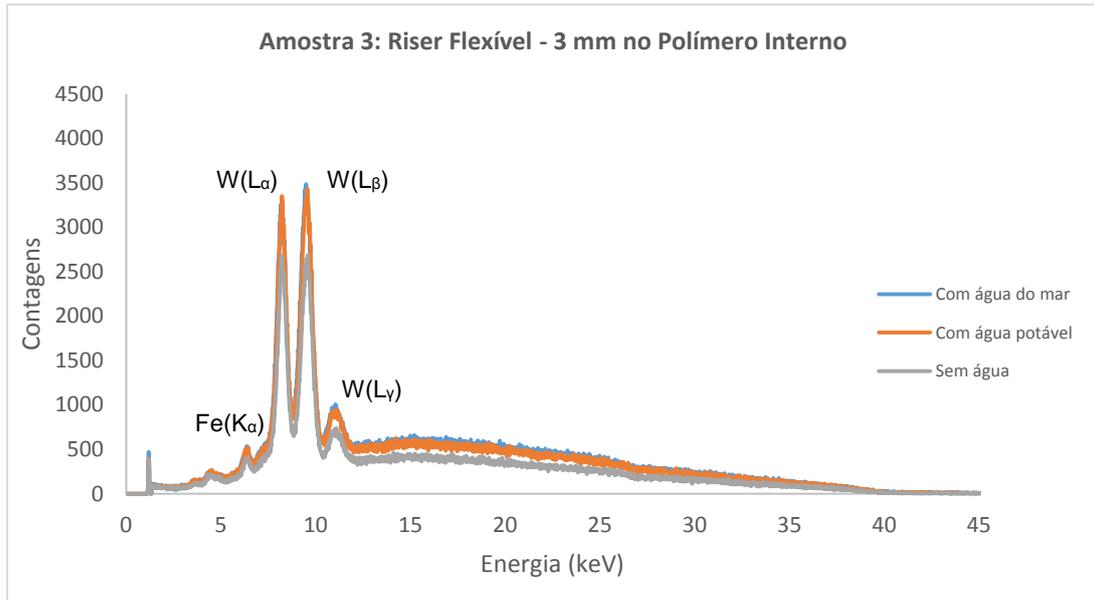


Figura IV.63 – Espectros na profundidade de 3 mm na camada Polimérica interna

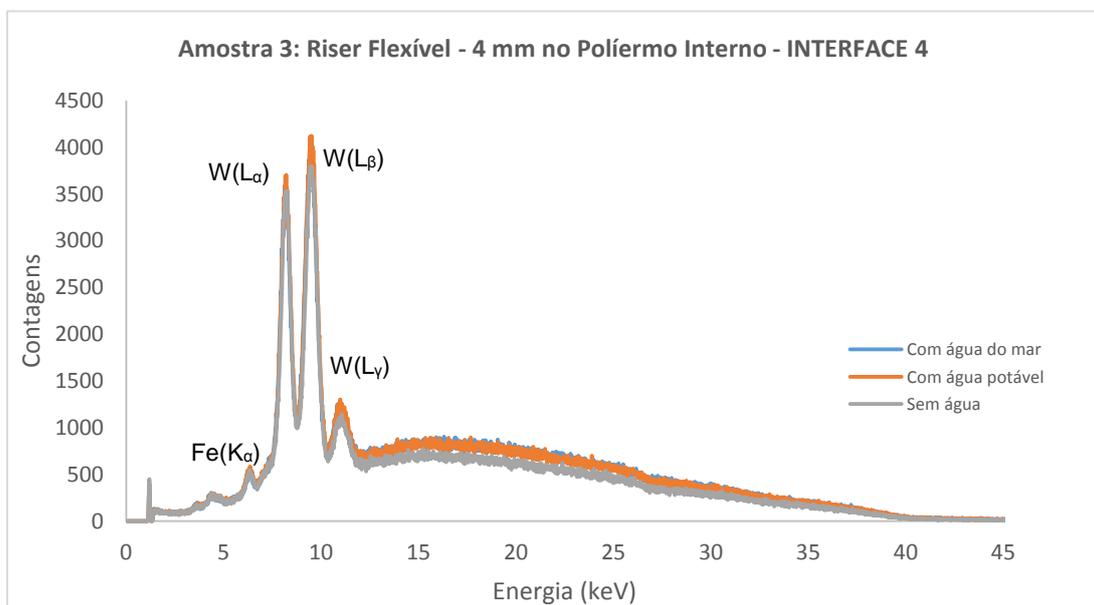


Figura IV.64 – Espectros na profundidade de 4 mm na camada Polimérica interna demarcando a quarta interface

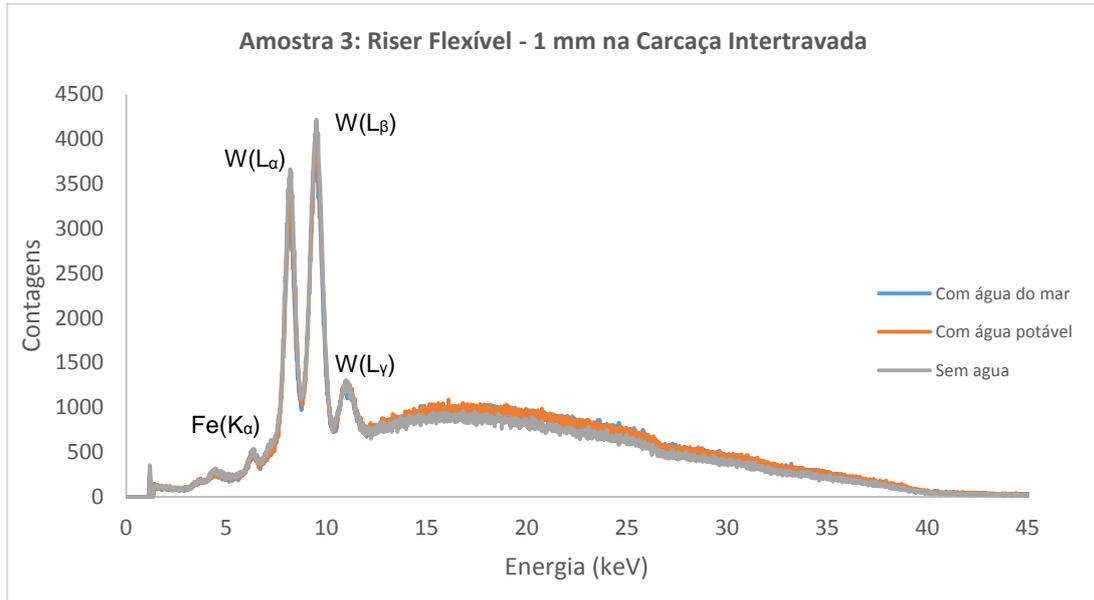


Figura IV.65 – Espectros na profundidade de 1 mm na camada Carcaça Intertravada

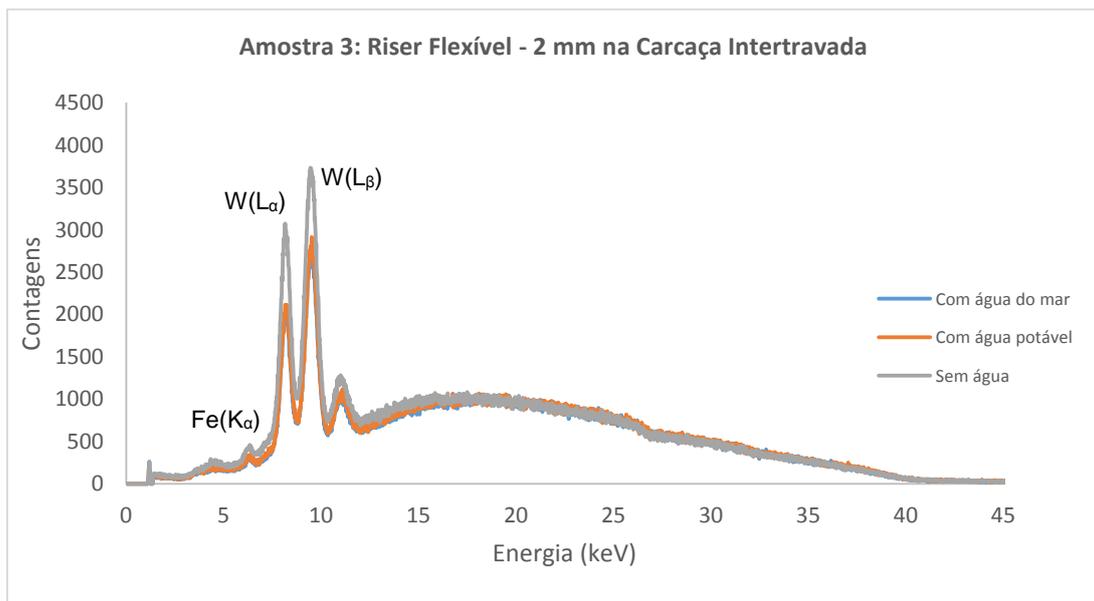


Figura IV.66 – Espectros na profundidade de 2 mm na camada Carcaça Intertravada

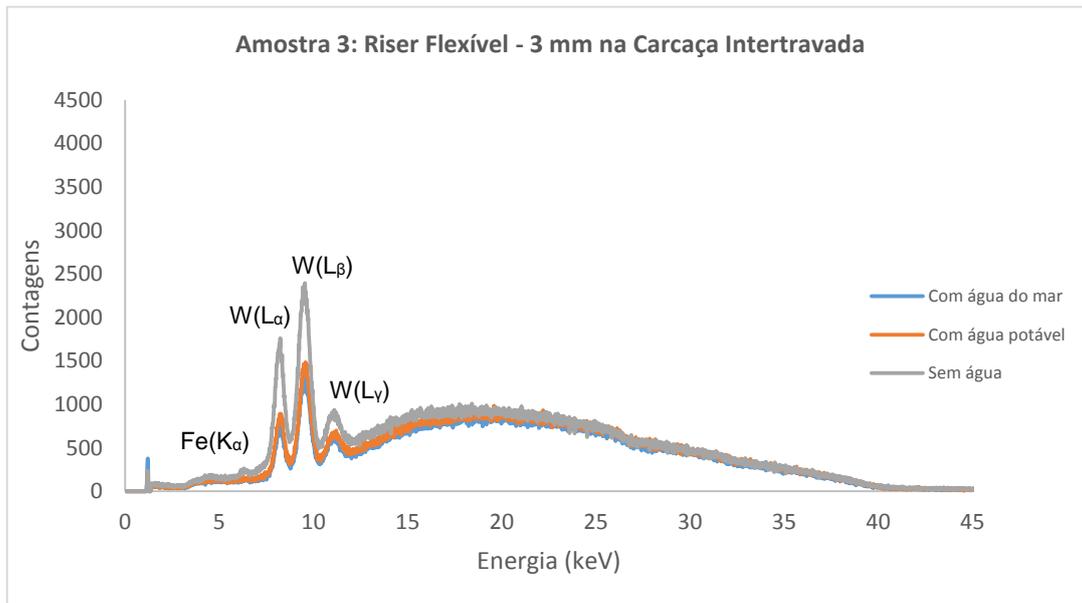


Figura IV.67 – Espectros na profundidade de 3 mm na camada Carcaça Intertravada

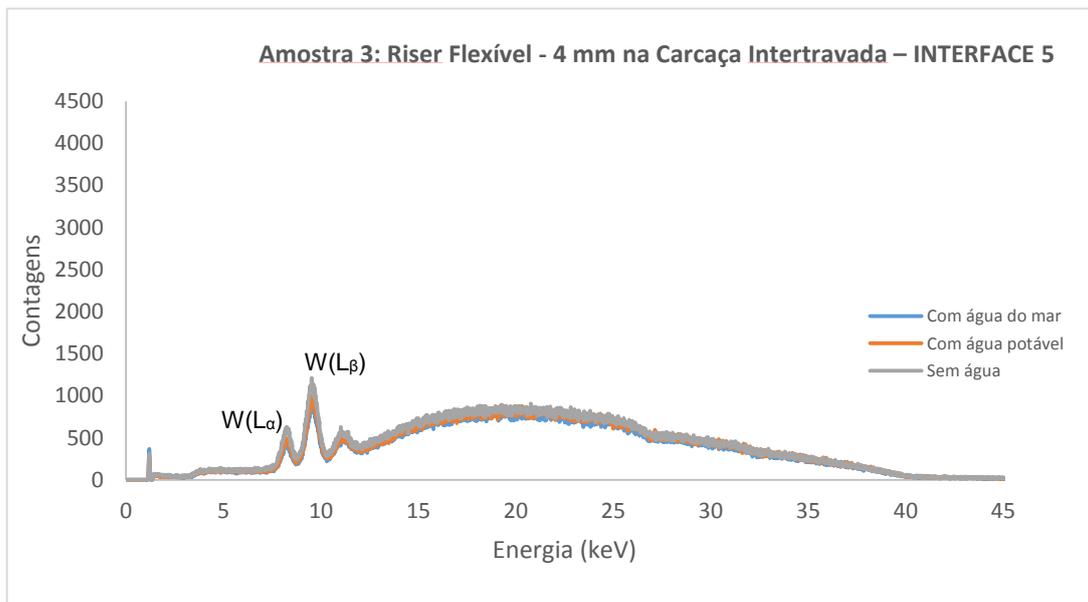


Figura IV.68 – Espectros na profundidade de 4 mm na camada Carcaça Intertravada demarcando a última interface

O capítulo a seguir faz uma reflexão sobre os espectros obtidos, fazendo considerações, sugestões e responde a pergunta feita na introdução.

CAPÍTULO V

CONSIDERAÇÕES, SUGESTÕES E CONCLUSÃO

Não, nossa ciência não é ilusão, mas uma ilusão seria procurar fora dela o que ela não pode nos dar.

*Freud*³²

Quando se assiste uma nave espacial³³ ser “atirada” para o espaço, de encontro a um pedaço do Universo, não dá para ficar indiferente a essa metodologia do ser humano de compreender a natureza: Ciência. Ainda mais: A complexidade na construção e no processo de medição do Grande Colisor de Hádrons³⁴, nos deixa perplexo.

Na ciência ninguém está impedido de falar. Não existe nenhuma conspiração contra a liberdade de expressão. Entretanto, o seu vocabulário silencia a maioria dos seres humanos. Mesmo para os conhecedores desse idioma, ele exige obediência a princípios independentes da sua subjetividade. Refutar conceitos e fatos estabelecidos lhe dá a supremacia libertadora do dogmatismo, mas sempre atendendo ao crivo experimental. (CASTRO, 2006)

Passei a minha graduação ouvindo o meu professor de física falar: O estudo é uma expressão de humildade. Me sinto pequena diante desses cientistas nobelistas ou não. No entanto, também me sinto privilegiada e ao mesmo tempo grande, por estar onde nunca imaginei que estaria. É com esse sentimento e sobretudo de que errar e acertar, faz parte da essência da ciência, é que finalizo esse trabalho fazendo considerações, sugestões e conclusão.

³² Sigmund Freud (1856-1939). Criador da psicanálise.

³³ A nave Rosetta, foi enviada a 10 anos ao cometa 67P. Descoberto em 1969 por astrônomos soviéticos, ele tem uma velocidade de 135 mil km/h e uma extensão máxima de 4 km.

³⁴ Um bom livro para saber da sua construção até a descoberta do Bóson de Higgs é o “Batendo à porta do céu” de Lisa Randall – 2013.

✓ Existe a possibilidade de evidenciar a energia característica de algum elemento químico³⁵ da água do mar (ver apêndice B) dentro do tubo. Se a sua medida mostrar-se possível, basta colocar o sistema de medida com o centro do voxel na superfície do tubo e em uma única medida do espectro o elemento químico seria evidenciado. No laboratório o problema estaria solucionado, mas a sua realização prática fica na dependência da tecnologia utilizada para a realização da medida.

Apesar dessa possibilidade utilizou-se da configuração experimental, descrita no capítulo III, para responder a pergunta feita na introdução da tese. É possível, através do espalhamento Compton, diferenciar o espectro de um tubo *riser* com ar de um com água?

✓ A montagem experimental utilizada envolveu o conhecimento de teorias bem estabelecidas, entretanto assim que os espectros foram obtidos, qualquer teoria que seja utilizada para explicá-los, deverá submeter-se aos espectros e não os espectros a teoria³⁶. Essa realidade experimental, nos conduz a uma resposta imperativa da existência ou não de água dentro do tubo sem o conhecimento de nenhuma teoria envolvida; ou seja, somente com a análise dos espectros é possível dizer: Sim ou não.

Richard Feynman³⁷, descontente com as explicações da realidade do Universo, dada pela física quântica, manifestou o seu pragmatismo nessa frase: Cale a boca, faça o cálculo. Feynman estava dizendo que a equação de Schrödinger³⁸ funciona. O que é ou não realidade, deixem para a filosofia.

Para o nosso caso essa frase seria: Não explique, mostre os espectros.

³⁵ O bromo que aparece no espectro 7 (Figura IV.7) da página 56 mostra essa possibilidade.

³⁶ Planck (1858-1947) resolveu o problema conhecido como catástrofe do ultravioleta, forçando a teoria ajustar-se a experiência. Chamou a sua atitude de um ato de desespero. Essa atitude desesperada mudou o paradigma da ciência e constrói quase toda tecnologia moderna.

³⁷ Feynman (1918-1988) criou a teoria da eletrodinâmica quântica (QED), que permite o estudo de partículas individuais, tais como fótons, elétrons e outras partículas que possuem carga elétrica.

³⁸ Schrödinger (1887-1988) calculou uma equação ondulatória que ficou conhecida como: equação de Schrödinger, para a mecânica quântica.

Vamos contrariar Feynman e fazer algumas considerações teóricas sobre os espectros obtidos. Dois motivos nos encorajam:

1. Qualquer erro não invalida o trabalho realizado; e
2. Na ciência atual, a interpretação incorreta de um fato produz pouco prejuízo, pois todos se ocupam do prazer salutar de provar a sua falsidade. (CASTRO, 2006)

✓ Primeiramente vamos tentar ajustar a teoria para o espectro característico (L_α e L_β)³⁹ do tungstênio, que se apresenta em todos espectros do *riser* simulado e flexível.

No espalhamento Compton o fóton interage com um elétron livre (pouco ligado) trocando momento linear e energia com o elétron. Um novo fóton surge com um comprimento de onda maior dado por: $\lambda' = \lambda + \lambda_c(1 - \cos \theta)$, onde λ' é o fóton espalhado no ângulo θ e λ é o fóton incidente. O comprimento de onda Compton é dado por: $\lambda_c = \frac{h}{mc}$, onde h é a constante de Planck, c é a velocidade da luz e m é a massa de repouso do elétron.

Para energias abaixo de 100 keV o espalhamento Compton pode ser considerado isotrópico (não existe direções privilegiadas). O gráfico abaixo mostra essa situação.

³⁹ Esses espectros são devido ao alvo de tungstênio do anodo da ampola de raios x.

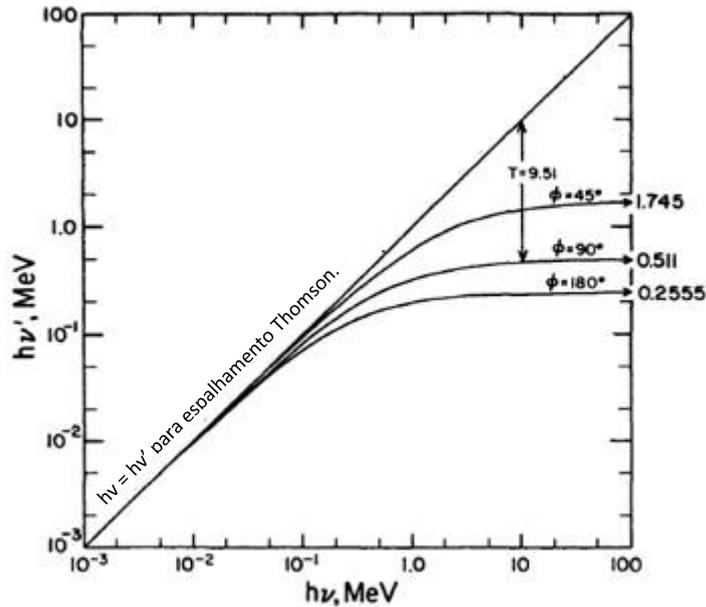


Figura V.1 – Representação gráfica da relação cinemática de $h\nu$, $h\nu'$ e de T no efeito Compton. As curvas são mostradas apenas para $\phi = 0^\circ$, 45° , 90° e 180° (ATTIX, 1986).

O detector está medindo o L_α (8,40 keV) e o L_β (9,67 keV) espalhados com a mesma energia, portanto o espalhamento incoerente não se justifica.

A questão se resolve teoricamente com o espalhamento coerente, dessa forma: Para esse tipo de interação o elétron está fortemente ligado ao núcleo do átomo. Neste caso o átomo inteiro recua com a interação. Portanto, no lugar da massa do elétron na equação $\lambda' = \lambda + \frac{h}{mc}(1 - \cos \theta)$ devemos colocar a massa do átomo M . Sendo a massa do átomo milhares de vezes maior do que a massa do elétron; temos: $\frac{h}{Mc} \rightarrow 0$; então: $\lambda' \cong \lambda$. Assim, a interação se processa somente com a troca de momento linear, conservando-se a sua energia. Experiência e teoria se ajustam.

Um outro aspecto da radiação característica L_α e L_β , mostrados nos espectros do *riser* simulado (sem a armadura de tração) e flexível (com a armadura de tração), está na contagem dessas radiações. A energia de L_α é menor do que L_β , portanto espera-se uma maior contagem de L_β , quando se observa somente a técnica de transmissão dessas radiações. Os espectros obtidos mostram pontos dentro do tubo onde a contagem de L_α é maior do que L_β .

Este fato experimental pode se ajustar teoricamente dentro de uma competição entre o espalhamento e a absorção dessas radiações. A intensidade dos raios X é maior para energias médias. A contagem de L_{α} é maior do que L_{β} e conseqüentemente L_{α} é maior do que L_{β} .

A medida que o tubo vai sendo “iluminado” a contagem de L_{α} é maior do que L_{β} , devido ao seu maior espalhamento. A contagem vai crescendo com o aumento da “iluminação”. As radiações espalhadas, na frente do *voxel*, vão enfrentando um caminho maior para saírem de dentro do tubo. Assim L_{α} , que é menos energética, vai perdendo intensidade até igualar-se com L_{β} . “Iluminando” mais o tubo a intensidade de L_{β} supera a de L_{α} . Aprofundando mais a “iluminação” a absorção supera o espalhamento e a intensidade de L_{α} e L_{β} começam a diminuir. Nesse momento, a região que contém ar e depois água influenciam na contagem da radiação como o esperado na técnica de transmissão. A contagem da radiação do tubo com ar torna-se maior do que com água potável e a contagem com água potável torna-se maior do que a contagem com a água do mar.

Embora essa explicação teorizada nos pareça razoável, a obtenção espectral, por espalhamento Compton em tubos *risers* é complexa. É necessário aprofundar mais na teoria, para tentar buscar detalhes que estão escapando, devido a nossa carência teórica.

O aparecimento da energia característica K_{α} do ferro (6,40 keV) foi essencial para a localização do voxel dentro do tubo. Sabíamos da superfície do tubo (cádmio) e depois da superfície do aço (ferro), portanto o comprimento do polímero e da armadura de tração podiam ser medidos, na régua utilizada para as medidas dos passos lineares, para aproximarmos o tubo para a área “iluminada”.

A radiação característica do ferro é produzida dentro do tubo, portanto a sua passagem pelo ar e depois pela água, deveria mostrar uma contagem maior no detector quando estivesse passando pelo ar. Entretanto, não é esse o cenário que os espectros do *riser* simulado (sem armadura de tração) está nos mostrando.

O que está evidenciado é que a presença da água e sobretudo da água potável é a responsável pelo aumento nas contagens da radiação transmitida.

CESAREO (2012) escreveu: Em média precisa-se de apenas 22 eV para produzir um elétron de baixa energia na água. A produção de radiação de fótons de baixa energia é abundante. Um elétron de 10 keV, por exemplo, produz um total de

aproximadamente 450 elétrons secundários. Uma grande fração desses elétrons, ocorrem com energia inicial menor do que 100 eV.”

O efeito fotoelétrico e Compton produzem elétrons que vão interagir com o meio. O processo é complexo, mas vamos nos deter nos conceitos básicos. Para isso vamos utilizar a navalha de Occam⁴⁰.

Stopping power ou Poder de freamento (S) é dado por: $S = -dT/dx$ onde dT/dx é a perda da energia cinética da partícula incidente por unidade de comprimento percorrido no material. A perda de energia é maior quando a velocidade da partícula é menor. O poder de freamento pode ser escrito como: $S = \left(\frac{dT}{dx}\right)_C + \left(\frac{dT}{dx}\right)_R$. O primeiro termo é denominado poder de freamento de colisão e o segundo, poder de freamento de radiação. A perda de energia por colisão ocorre próximo à trajetória da partícula⁴¹ e a perda de energia por radiação ocorre longe do local de interação. O alcance de uma partícula em um dado meio é dado por: $R = \int_0^{T_0} \frac{dT}{dS}$, que é a distância que a partícula percorre no material até parar.

Vamos considerar a energia do fotoelétron e da radiação incidente para o espalhamento Compton de 45 keV ⁴², para o nosso cálculo.

Uma fórmula semi-empírica para calcular o alcance de elétrons, em materiais de baixo número atômico e com energia cinética T (em MeV), com energia entre 0,01 e 2,5 MeV é dada por: $R\left(\frac{g}{cm^2}\right) = 0,412 T^{(1,27-0,095 \ln T)}$. Para a energia do fotoelétron de 0,045 MeV o alcance calculado dá: $R = 3,22 \times 10^{-3} g/cm^2$. Dividindo pela densidade da água; temos: $R = 3,22 \times 10^{-3} cm$ ⁴³. Assim o alcance do fotoelétron é de $R = 0,032 mm$.

⁴⁰ Willian de Ockham (1285-1349). Sintetizando o seu pensamento: Deve-se optar pela simplicidade.

⁴¹ Existe uma situação na qual as partículas carregadas perdem energia por colisão longe do local de interação. São os elétrons secundários de alta energia (raios δ).

⁴² Essa é a energia máxima produzida pelo aparelho de raios X. Estamos considerando uma situação extrema para a nossa análise. A função trabalho foi negligenciada.

⁴³ Considerando o fotoelétron não relativístico; temos: $T = \frac{p^2}{2m}$ Mas De Broglie escreveu em sua tese que: Toda partícula tem a sua função de onda associada. $p = \frac{h}{\lambda} \Rightarrow \lambda = \frac{h}{\sqrt{2mT}}$. Colocando os valores; temos: $\lambda = 0,0818 \text{ \AA}$. Dividindo $3,22 \times 10^{-3} cm$ por $0,0818 \times 10^{-8} cm$; obtemos: 3926,4. Ou seja, o comprimento de onda associado ao elétron cabe 3936,4 em 0,032 mm.

A figura II.11 da página 29 mostra que para energia do fóton baixa, o ângulo do fotoelétron mais provável é de 70°. em relação a direção de incidência da radiação. Portanto, o caminho percorrido por esses fotoelétrons torna-se maior até chegar a estrutura de aço (que contém o ferro) do tubo *riser*. Ainda mais: Muitos desses elétrons estariam saindo do volume “iluminado”. Assim, para que um fotoelétron possa entregar a sua energia e provocar fluorescência no ferro, o efeito fotoelétrico deverá ocorrer próximo a armadura de aço do tubo⁴⁴.

Uma outra hipótese é produção de raios X provocada pelos fotoelétrons. Essa é uma situação em que todo o volume de água “iluminada” poderia estar contribuindo, pois a energia dos raios x emitidos, podem ser depositadas longe das interações⁴⁵.

Vamos calcular a energia cinética (T) de recuo do elétron, provocada por espalhamento Compton e o seu ângulo em relação a radiação incidente. A energia cinética é dada por: $T = hf \left[\frac{\alpha(1-\cos\theta)}{1+\alpha(1-\cos\theta)} \right]$ onde $\alpha = \frac{hf}{mc^2}$. O interesse é o espalhamento para a frente. Considerando que parte da energia do fóton entregue ao elétron aumenta de 0° até 90°, o ângulo usado será de 80°. Fazendo os cálculos encontramos, para uma energia de 45 keV ($72,09 \times 10^{-16}J$) do fóton incidente, a energia cinética de recuo do elétron é de: $T = 4,88 \times 10^{-16}J$ (3,05 keV)⁴⁶.

O ângulo de recuo do elétron é dado por: $\cot\varphi = (1 + \alpha) \operatorname{tg}\left(\frac{\theta}{2}\right)$. Fazendo o cálculo; temos: $\varphi = 42,39^\circ$. As considerações são as mesmas do fotoelétron. Entretanto, o alcance desses elétrons são bem menores.

Uma outra hipótese seria o espalhamento Compton aumentar, próximo da energia de fluorescência do ferro, devido a presença da água.

A composição da água (Apêndice B) e o espectro contínuo da radiação X, provocam interações diferenciadas. A nossa tentativa de teorizar os espectros obtidos, partiu da energia extrema do espectro de raios X, objetivando compreender um pouco esse processo complexo de interação da radiação com o tubo *riser*.

⁴⁴ De acordo com Cesario a densidade eletrônica da água (elétrons/cm³) x 10²³ é igual a: 3,34 x 10²³. Portanto, esta hipótese não pode ser desprezada.

⁴⁵ Os elétrons podem, também, estar interagindo por freamento com a estrutura do aço do tubo *riser*.

⁴⁶ Para $\theta = 30^\circ$ a energia de recuo do elétron é de 0,5 keV.

Sabemos que uma hipótese é uma suposição duvidosa, mas sabemos também que uma hipótese antecipa um conhecimento que poderá ser posteriormente provado.

✓ Com a percepção de que a localização do centro do voxel, nas camadas do tubo, seria essencial para diferenciar os espectros, diminuimos o seu tamanho. Trabalhamos dentro dos limites físicos da nossa configuração experimental.

Para a realização da primeira medida, preparamos um tubo *riser* sem a armadura de tração (*riser* simulado), objetivando compreender a influência do espalhamento da radiação com o tubo com o ar e com água.

Na região de interesse, os espectros mostram um aumento nas contagens de L_{α} e L_{β} da água do mar. Não consideramos este resultado como evidência de um padrão. Entretanto, a presença da contagem da radiação característica do ferro, na presença de água potável, não podia ser ignorada. A contagem da radiação K_{α} do ferro apresenta-se maior do que a contagem da radiação L_{α} e L_{β} do tungstênio, em determinados pontos do tubo. Isso só é possível com a presença da água⁴⁷.

A nossa intuição nos dizia que precisávamos encontrar um espectro padrão, onde a presença da água seria evidente com a realização de apenas uma “iluminação” e que também não dependesse do espectro da radiação do tubo no ar⁴⁸.

Tínhamos encontrado um padrão, onde a técnica procurada poderia ser aplicada. Pelo menos na extração de petróleo em bacia hidrográfica.

Na ciência temos que observar a seguinte assertiva: Todo o nosso esforço deve ser no sentido de fazer com que nossas aspirações se adequem aos fatos e não os fatos se adequem as nossas aspirações.

A empolgação foi se dissolvendo, devido a dura realidade que tínhamos que enfrentar. A armadura de tração teria que voltar para dentro do tubo. Essa situação real diminui drasticamente a quantidade de água e a absorção aumenta.

Nesse momento, já estávamos com nossas conjecturas teóricas, um pouco mais estabilizadas. Sabíamos que o tamanho do voxel deveria ser aumentado, entretanto,

⁴⁷ A contagem do K_{α} do ferro do aço do tubo com ar, não é o suficiente para apresentar esse padrão.

⁴⁸ As nossas experiências estavam sendo realizadas dentro de um laboratório, mas sabíamos que o seu objetivo era a sua realização prática; ou seja, o espectro deveria ser obtido com o tubo dentro da água e em profundidade.

resolvemos realizar a primeira medida real do tubo, com o voxel do mesmo tamanho do que foi usado no tubo simulado⁴⁹.

✓ Depois de muitos erros e acertos, tanto experimentais como teoricamente, estávamos prontos para a realização da primeira medida com o *riser* flexível (real – com a armadura de tração). A expectativa era grande, pois a resposta sim ou não, a pergunta feita na introdução da tese, seria respondida.

Os espectros obtidos⁵⁰, mostraram que a água do mar foi a salvação. Se tivéssemos usado somente a água potável, o fracasso momentâneo⁵¹ estaria evidenciado. Na competição entre o espalhamento e a absorção, com o tamanho do *voxel* usado, os espectros do tubo flexível com ar e com a água potável dão a mesma contagem.

✓ Mudamos a configuração experimental, para aumentar o tamanho do *voxel*, objetivando aumentar as contagens das radiações espalhadas e realizamos uma nova medida. Os espectros obtidos, mostram que tanto a água potável como a água do mar, servem como padrões para identificação de água dentro do tubo *riser* flexível.

✓ Analisando os espectros do tubo *riser* flexível com ar, água potável e do mar, em cada processo de medida, ou seja, com passos lineares de 1 mm, percebemos que na região de interesse a ser investigada, eles se apresentam com características que somente a presença de água poderia ser justificada. Portanto, é possível saber, utilizando a técnica do espalhamento Compton, se o tubo *riser* flexível está ou não inundado de água. Assim, a pergunta feita na introdução, pode ser respondida de forma imperativa: Sim.

✓ Acreditamos ser possível melhorar (diferenciar) os espectros procedendo-se da seguinte forma: Diminuindo a tensão (V) aplicada ao tubo e conseqüentemente a energia máxima emitida $\left(\lambda_{min} = \frac{hc}{eV}\right)$. A energia média dos raios X aproxima-se dos valores de L_{α} , L_{β} do tungstênio e K_{α} do ferro. Ainda mais: Podemos aumentar a corrente

⁴⁹ Queríamos aproveitar a mesma configuração experimental.

⁵⁰ As comparações estão sendo feitas nas contagens espalhadas das radiações L_{α} e L_{β} do tungstênio, nas regiões do tubo onde o centro do voxel está localizado na região de interesse.

⁵¹ Momentâneo, pois estávamos convictos que o voxel deveria ser aumentado, para obter o resultado esperado.

para produzir mais fótons. O gráfico abaixo mostra os espectros contínuos do raio X com a mudança de tensão (V).

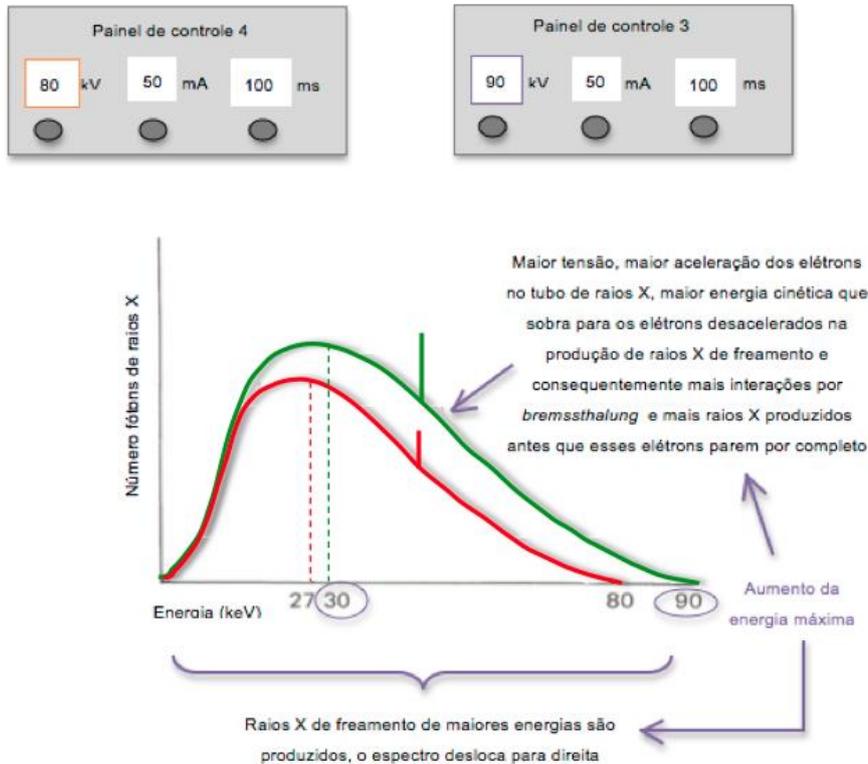


Figura V.2 –Influência da tensão sobre o espectro de raios X.

✓ Embora o procedimento utilizado, anteriormente, tenha se mostrado positivo, ele é inviável na prática. Podemos torná-lo mais realístico procedendo da seguinte forma: Colocamos o centro do voxel na região de interesse e fazemos uma única medida com o tubo flexível com ar e depois o mesmo procedimento, em uma única medida, com o tubo flexível inundado.

Esse procedimento, ainda que viável, carrega consigo um problema. A necessidade do conhecimento do espectro do tubo com ar, para efeito de comparação. Precisamos achar um padrão onde o espectro do tubo com o ar possa ser ignorado.

✓ O espectro abaixo, obtido com água do mar, mostra o espectro característico do bromo começando a ser evidenciado. A possibilidade de obter o espectro característico de qualquer elemento da água do mar, viabiliza o processo de diferenciação sem a necessidade do espectro do tubo com o ar.

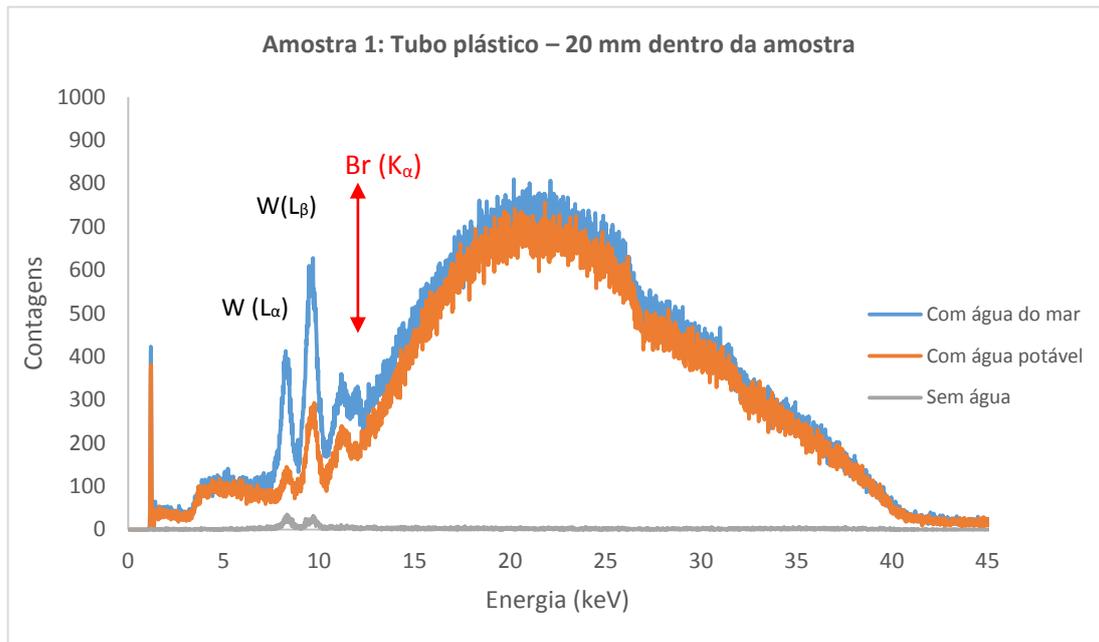


Figura V.3 – Espectro na profundidade de 20 mm dentro da amostra 1 (tubo de plástico) evidenciando (escala alterada) o aparecimento do bromo (Br).

✓ O sucesso desse método está na obtenção de um padrão que evidencie a presença da água no tubo, sem a necessidade do espectro do tubo com o ar. A sua simplicidade de dizer sim ou não, com a realização de apenas uma medida, justifica a pesquisa na procura dessa possibilidade.

Uma pergunta inevitável. É possível, com a configuração usada, construir um sistema para uma medida real?

✓ Na bacia de Campos esses tubos chegam a uma profundidade de 5000 metros (pelo menos 2000 metros de sal). Eles são emendados em um processo conhecido como flange de acoplamento. As camadas estruturais do tubo são isoladas, portanto cada pedaço deverá ser analisado separadamente. A cada 10 metros de profundidade aumenta-se uma atmosfera, assim partes desses tubos estão submetidos a uma diferença de pressão considerável.

A nossa proposta baseia-se nas seguintes considerações:

1. Só se aplica até a primeira emenda;
2. A sua estrutura em camadas deverá estar livre na parte de cima⁵², e
3. Temos que ter um espectro do tubo com ar.

Um sistema fechado, com a configuração usada seria colocado encostado ao tubo. O voxel previamente calculado estaria com o seu centro perto da superfície do tubo. O resto do aparato experimental estaria na plataforma ligado pelos fios.

Existe um recurso que essa configuração oferece. Pode-se variar a corrente do tubo⁵³ de raios X.

✓ Se a técnica, para obtenção de informações sobre os tubos *risers*, por espalhamento Compton, se mostrar viável, tornar-se-á revolucionária, devido a sua simplicidade de dizer sim ou não. Entretanto, para sua realização três fatores devem ser observados: A procura de uma energia específica para evidenciar um padrão, a localização do centro do voxel e o seu tamanho.

✓ Praticamente toda estrutura social do nosso planeta está associada ao petróleo e praticamente todo o petróleo está associado aos tubos *risers*. Portanto, todo investimento para manter a sua integridade, se justifica.

A ciência às vezes funciona assim: “Sem saber que aquilo era impossível; ele foi lá e fez”⁵⁴.

⁵² Qualquer dano na estrutura do tubo que permite a entrada de água, faria com que a água subisse, devido a diferença de pressão. Assim, o aparelho de medida poderia ser colocado perto da superfície.

⁵³ Precisa de verificação experimental, sobre a sua influência nos espectros dos tubos *risers*.

⁵⁴ Há controvérsias se esta frase é de Jean Cocteau (1889-1963) ou de Mark Twain (1835-1910).

REFERÊNCIAS

- ATTIX, F. H., *Introduction to Radiological Physics and Radiation Dosimetry*, 1ª ed., Ed. Eiley, J. e Sons, New Yourk, USA, 1986.
- AMPTEK INCORPORATION. Operating Manual XR-100T-CZT, 2003.
- ANJOS, M. J., LOPES, R. T., “Espalhamento Compton de Raios Gama em Testes Não destrutivos”. Encontro Nacional de Supervisores de Radioproteção Industrial, ABENDE, São Paulo, 1988.
- ANJOS, M. J., LOPES, R. T., “Inspeção de Estruturas Metálicas utilizando Espalhamento de Raios Gama”. X Seminário Nacional de Ensaio Não Destrutivos, ABENDE, Salvador, 1990.
- BELTRAN, D. J. M. C., *Estudo da Influência do Retroespalhamento de Raios x em Materiais na Qualidade de Imagem da Radiografia Computadorizada*. Dissertação de Mestrado, COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, 2010.
- BITELLI, T., *Física e Dosimetria das Radiações*, 2ª ed., Ed. Atheneu, São Paulo, 2006.
- BOLDO, E. M., APPOLONI, C. R., “*Inspection of reinforced concrete samples by Compton backscattering technique*”. Elsevier, 2014.
- BUENO, A. F. B., *Avaliação das Armaduras de Tração de Riser Flexível Durante Ensaio Axiais de Tração e Fadiga*. Tese de Doutorado, PPGEM/UFRGS, Porto Alegre, 2010.
- CASTRO, C. R. F., *Tomografia por Difração de raios x em tecidos biológicos utilizando radiação síncrotron*. Tese de Doutorado, COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, 2006.
- CESAREO, R, et al, “Interaction of keV Photons With Matter and New Applications”. Physics Reports. North-Holland, 1992.
- CESAREO, R. et al, “90° Compton and Rayleigh measurements and imaging”. Pergamon. 2001.
- CESAREO, R., “Structure of the atom and of the núcleos”, Istituto di Matematica e Fisica, Università di Sassari, Sassari, Italy, 2012.
- CHUNG, K. C., *Introdução à Física Nuclear*. Ed. EdUERJ, Rio de Janeiro, 2001.

DEPT. OF PHYSICS, S. D., "Rayleigh and Compton Scattering Cross-sections for 19.648 keV Photons". *Nature and Science*, Haryana, India, 2011; 9(10).

HALLIDAY, D., et al, *Fundamentos de física*, volume 4: óptica e física moderna, 9ª edição. Ed. LTC, Rio de Janeiro, 2012.

HARDING, G., HARDING, E. "Compton Scatter imaging: A tool for historical exploration". Elsevier. 2010.

INMETRO, Vocabulário Internacional de Metrologia: Conceitos fundamentais e gerais e termos associados (VIM 2012). Duque de Caxias, Rio de Janeiro, 2012.

KNOLL, G. F., *Radiation Detection and Measurement*, 3ª ed., New York, Willey, 2000.

MALTA, E. R., *Projeto de um riser flexível para águas ultraprofundas*. Trabalho de Conclusão de Curso, USP, São Paulo, 2010.

MARTINS, D. O. C., *Desenvolvimento de Metodologias de Inspeção e Monitoramentos de Risers Flexíveis através de Técnicas Micromagnéticas de Análise de Tensões*. Tese de Doutorado, UFRS, Porto Alegre, 2008.

MARTINS, R. A., ROSA, P. S., *História da teoria quântica: a dualidade onda-partícula, de Einstein a De Broglie*. Editora Livraria da Física, São Paulo, 2014.

OLIVEIRA, C. S. S., *Estudo da Técnica de Retroespalhamento de Raios X e Gama na Inspeção de Dutos Compósitos*. Dissertação de Mestrado, COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, 2009.

OKUNO, E., YOSHIMURA, E. M., *Física das Radiações*. São Paulo: Oficina de Textos, 2010.

PADILHA, J. A. P., *Análise Estrutural de Riser Flexível com Armaduras de Tração em Titânio*, Dissertação de Mestrado, COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, 2009.

PERUZZO, J. et al, *Física moderna e contemporânea: das teorias quânticas e relativísticas às fronteiras da física*. Volume 1, Editora Livraria da Física, São Paulo, 2013.

PETROBRÁS, Petróleo Brasileiro S./A. Disponível na internet em:

http://www.petrobras.com.br/pt/?gclid=CMXtsOzi_cMCFXJp7AodXk4AGw Acesso em 10 dez. 2014, 17:20.

RANDALL, L., *Batendo à porta do céu: O bóson de Higgs e como a física moderna ilumina o universo*. Tradução Rafael Garcia. São Paulo: Companhia das Letras, 1ª edição, 2013.

SHARMA, A. et al, “Incoherent scattering of gamma photons for non-destructive tomographic inspection of pipeline”. Elsevier. Índia, 2010.

SILVA, I. L. M. et al, “Tube defects inspection technique by using Compton gamma-rays backscattering”. Elsevier, Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment, 1999.

SIMÕES, T. B., *Monitoramento de risers flexíveis com sensores a fibra óptica*. Dissertação de Mestrado, PUC, Rio de Janeiro, 2011.

SINGH, M. P., et al, “Non-destructive evaluation of scientific and biological samples by scattering of 145 keV gamma rays”. Elsevier. Índia, 2010.

SOARES, C. et al, “Colimador alternativo para um detector de CdTe (modelo XR-100T), usado em medidas diretas de espectros de radiodiagnóstico”. Scientia Plena, Vol 10, Num 01, 2014.

TAUHATA, L, et al, *Radioproteção e Dosimetria: Fundamentos*. Instituto de Radioproteção e Dosimetria, Comissão Nacional de Energia Nuclear, 5ª revisão, Rio de Janeiro, 2003.

ANEXO I

SOBRE O RISER FLEXÍVEL

Este anexo foi compilado e adaptado de MALTA, E. R., “*Projeto de um riser flexível para águas ultraprofundas*”. Trabalho de Conclusão de Curso, USP, São Paulo, 2010.

Os *risers* são basicamente tubos muito longos e formados por várias camadas que possibilitam o transporte de petróleo em águas ultraprofundas. Em especial, os *risers* flexíveis possuem diversas aplicações no campo da engenharia *offshore* que, segundo a API (*American Petroleum Institute*) são classificadas em:

- a) Produção – petróleo, gás, condensados e água;
- b) Injeção – água, gás e produtos químicos para o poço;
- c) Exportação – petróleo semiprocessado e gás;
- d) Serviços – produtos químicos de topo de poço e fluidos de controle.

Estruturalmente, o *riser* é capaz de suportar os esforços resultantes do ambiente hostil onde ele está inserido. Os esforços vão desde cargas estáticas, que podem ser o peso próprio do tubo ou a pressão da coluna de água sob a qual o mesmo está inserido, a cargas dinâmicas resultantes de correntes marítimas e movimento da unidade flutuante.

Além disso, o tubo deve ser capaz de resistir à corrosão marítima, reações químicas com o fluido no seu interior e mudanças de temperaturas. Por este motivo, o *riser* é formado por diversas camadas de materiais e geometrias diferentes. A quantidade e o tipo de tais camadas variam conforme o tipo de *riser*.

A figura A1.1 descreve um *riser* classificado segundo a norma API como “*Rough Bore Reinforced*”. A configuração escolhida apresenta cinco camadas principais que serão explicadas em mais detalhes logo em seguida:

- ✓ Carcaça Intertravada;
- ✓ Camada Polimérica Interna;
- ✓ Armadura de Pressão;
- ✓ Armadura de Tração;
- ✓ Camada Polimérica Externa.

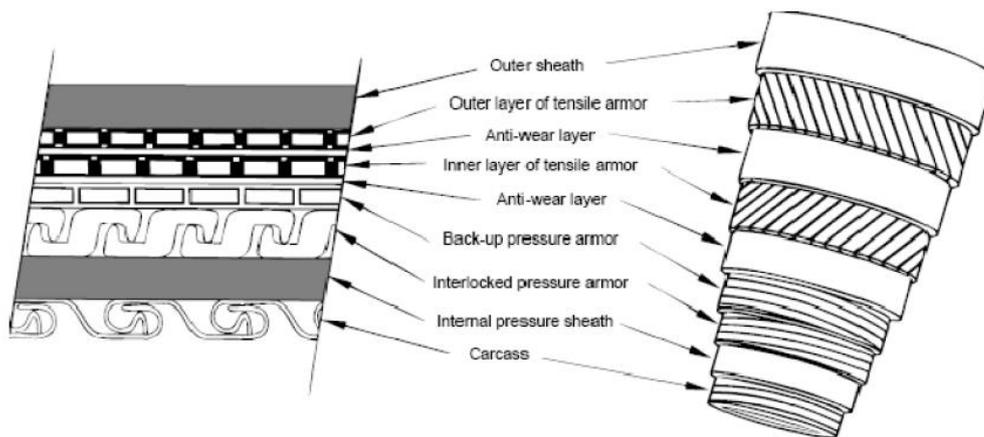


Figura A1.1 – As camadas de um tubo da família “*Rough Bore Reinforced*”. Fonte: *API Recommended 17B*.

- **Carcaça Intertravada**

Iniciando a descrição das camadas de dentro para fora do tubo, a primeira camada encontrada seria a carcaça intertravada. Esta se constitui de uma espiral em hélice de um perfil semelhante ao apresentado na Figura A1.2. Este perfil varia minimamente conforme o fabricante.



Figura A1.2 – Perfil da carcaça intertravada. Fonte: *API Recommended 17B*.

A função principal desta camada é a de proteger o tubo da pressão externa à qual está submetido o *riser*. Desta forma, pode-se dizer que a mesma previne o colapso do tubo. A sua forma peculiar permite um deslocamento axial do tubo.

Em termos de material, a carcaça intertravada é um componente bastante crítico. A mesma está em constante contato com o fluido de escoamento. Esta camada não pode reagir de forma alguma com o seu conteúdo, pois a liberação de produtos de reação química iria contaminar o que quer que seja que esteja circulando em seu interior, seja petróleo ou água. Além disso, a carcaça deve suportar o desgaste causado

pelo deslocamento de sondas de inspeção e ferramentas em seu interior. Por fim, a mesma ainda deve ser capaz de cumprir com a sua função de evitar o colapso do tubo.

- **Camada Polimérica Interna**

Seguindo a lógica da descrição das camadas do tubo, a camada seguinte seria a camada polimérica interna. Em termos de aspecto construtivo, esta camada é bem mais simples do que as camadas metálicas. Esta possui uma forma de capa que recobre o tubo por toda a sua extensão. Essa capa polimérica é inserida no tubo através de extrusão direta, ou seja ela possui uma boa aderência para com a camada imediatamente anterior a ela.

A função desta camada dentro do tubo é a de vedação. Ou seja, ela garante a integridade do fluido que escoar em seu interior evitando o seu contato com o meio externo.

Em termos de material, a mesma deve se constituir de um polímero capaz de suportar a pressão interna do fluido que escoar no interior do tubo. Ao mesmo tempo, ela deve possuir uma certa elasticidade axial para se deslocar juntamente com a carcaça sem que haja descolamento de camadas.

- **Armadura de Pressão**

Juntamente com a carcaça intertravada, a armadura de tração tem como função a de resistir às cargas de colapso do tubo. Esta é uma espécie de camada de suporte, pois a mesma também auxilia a camada polimérica interna a suportar a pressão interna do fluido no interior do tubo. Além disso, durante a fase de lançamento e instalação do *riser*, as camadas sofrem um esmagamento resultante da ação das sapatas da roda de lançamento. Essa força de esmagamento acaba sendo transmitida diretamente para a armadura de pressão e a carcaça intertravada.

Sua forma possui o mesmo princípio da carcaça intertravada. A armadura de pressão também possui um perfil produzido por espiralamento. Sua forma final é a de uma espiral em hélice. Seus perfis podem variar como mostra a Figura A1.3.

Com relação ao material da armadura de pressão, as características devem ser as mesmas do material da carcaça. Exceto pelo fato de que o material não precisa resistir ao desgaste causado pela circulação de sondas em seu interior nem às reações químicas causadas pelos fluidos que circulam nas camadas mais internas. Em certas ocasiões, ocorre a passagem de gases pela camada polimérica interna. Nestes casos,

a armadura de pressão irá sofrer um desgaste e sua vida em fadiga pode ser consideravelmente reduzida.

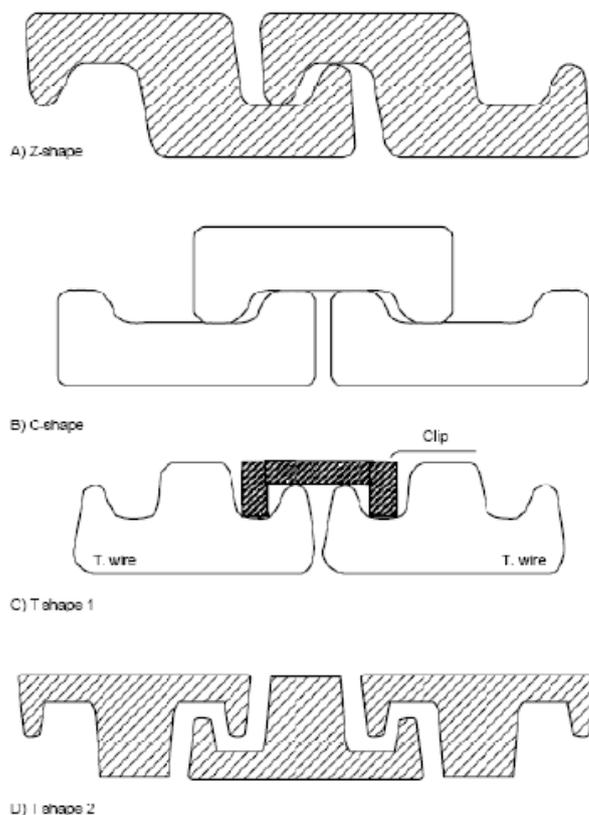


Figura A1.3 – Perfis variados da armadura de pressão. Fonte: *API Recommended 17B*.

• Armadura de Tração

A armadura de tração pode ser formada por duas ou quatro camadas de arame com perfil plano, retangular ou circular. Essas camadas são cruzadas entre si, ou seja, se uma delas é inserida no sentido horário, a outra é inserida no sentido anti-horário. O ângulo de cruzamento entre as camadas varia conforme o tipo de tubo entre 20 e 60°. Se no tubo em questão houver uma armadura de pressão (perfil em “Z”, por exemplo), o ângulo pode ser mais fechado, mais próximo de 20°. Dessa maneira, a camada irá resistir preferencialmente a esforços axiais. Caso não haja uma armadura de pressão, o ângulo deve ser mais próximo de 60° para que a armadura resista tanto a esforços no sentido axial quanto no sentido radial.

Sua função é basicamente, como o nome já diz a de resistir à tração no tubo, ou seja, carregamentos axiais oriundos do peso próprio do cabo (com fluido no seu interior ou não) e dos movimentos causados por correntes marítimas e movimentos de topo.

Mas, como dito no parágrafo anterior, sua estrutura pode ser modificada variando o ângulo de cruzamento entre as camadas para que a armadura suporte carregamentos radiais também. O material usado para a armadura de tração não difere muito do material usado na armadura de pressão.

- **Camada Polimérica Externa**

A camada polimérica externa é semelhante à camada polimérica interna em termos de fabricação. A mesma também é extrudada no exterior da camada imediatamente anterior. Ela possui a forma simples de tubo, por isso também é chamada de “capa plástica”.

Suas funções principais são duas: a de vedação, ou seja, ela deve proteger a integridade dos componentes do interior do tubo do ambiente externo e a de confinar a armadura de tração, de forma a evitar a sua instabilidade estática e a ocorrência de *Bird Caging*. Diferentemente da camada polimérica interna, esta estará em contato com o ambiente marinho e com o ambiente terrestre durante estocagem e transporte. Em termos de material, o polímero escolhido deve ser capaz de resistir a um meio bastante agressivo, choques mecânicos e ainda garantir a integridade do seu conteúdo.

- **Fitas Antidesgaste e Fitas Estruturais**

As fitas Antidesgaste são colocadas entre pares de camadas. Sua função é basicamente a de evitar o desgaste por atrito entre elas. Existem algumas fitas de Kevlar (fitas estruturais) que são capazes de garantir uma maior estabilidade estrutural para a armadura de tração. O uso de tais fitas ajuda a proteger a armadura contra o fenômeno do “*Bird Caging*”. A sua espessura é relativamente pequena em relação às outras camadas.

- **REGULAMENTAÇÃO:** Entidades que regulam e normatizam os *risers*

✓ **American Petroleum Institute (API):** Associação comercial norte americana que representa cerca de 400 empresas envolvidas nas fases de extração, refino e distribuição de petróleo;

✓ **International Organisation for Standardization (ISO):** Rede formada por organismos de regulamentação de 162 países, com sede em Genebra (Suíça).

✓ **Petróleo Brasileiro S.A. (Petrobrás):** Empresa brasileira de capital misto responsável pelo controle e exploração da maior parte das jazidas de petróleo em território nacional. Esta empresa se destaca das demais por estar na vanguarda das pesquisas em extração de petróleo em altas profundidades. Por ser a maior compradora de *risers* flexíveis do país, a Petrobrás estabelece alguns dos seus próprios padrões para certas etapas do projeto que devem ser seguidas. Vale ressaltar que estas normas são baseadas em padrões internacionais como **API** e **ISO**.

✓ **Det Norske Veritas (DNV):** Empresa norueguesa do ramo de gerenciamento de riscos. Atua como agência verificadora independente e fornece alguns parâmetros para a análise de fadiga.

• **NORMAS TÉCNICAS**

✓ **API Specification 17J:** Norma da **API** que apresenta os requisitos técnicos para o dimensionamento de um *riser* flexível;

✓ **API Recommended 17B:** Suplemento da norma 17J que define e exemplifica alguns casos de dimensionamento. Além disso, essa norma fornece algumas explicações básicas sobre a extração de petróleo em águas profundas;

✓ **ISO 13628-2:2006:** Norma baseada nas especificações 17J e 17B da **API**. A ISO 13628 define os parâmetros que o comprador do tubo flexível deve estabelecer para o fabricante e as informações que devem ser dadas ao mesmo;

✓ **NI – 2409 (Petrobrás):** Esta norma se constitui basicamente de um sumário e aplicação das normas da **API** e **ISO**. A mesma inicialmente define alguns termos técnicos usados no projeto de tubos flexíveis e no fim define parâmetros para testes em protótipos;

✓ **I-ET-3010.00-1500-960-PPC-006 (Petrobrás):** Nas últimas etapas do projeto, é feita uma análise dinâmica do tubo. Os dados de entrada e as saídas esperadas da análise são especificadas por esta norma. Ela define as condições de carregamento a serem aplicados no tubo e no veículo de superfície. Além disso, a norma também define que resultados devem ser coletados desta análise;

✓ **I-ET-3010.00-1500-960-PPC-002 (Petrobrás)**: Na fase final do projeto, é feita uma análise de fadiga da armadura de tração do tubo. Os dados de entrada e as saídas esperadas da análise são especificadas por esta norma. Ela define as condições de carregamento a serem aplicados no tubo e no veículo de superfície. Além disso, a norma também define que resultados devem ser coletados desta análise;

✓ **DNV-RP C203, 2005**: Esta norma fornece parâmetros importantes para a análise de fadiga. Estes parâmetros, em especial a curva S-N é a recomendada pelas normas da Petrobrás.

• **AGÊNCIAS DE VERIFICAÇÃO**

Para fiscalizar o cumprimento dessas normas, o fabricante deve contratar a chamada *IVA (Independent Verification Agency)*. Essas agências têm como objetivo a fiscalização da manufatura e dos testes dos tubos flexíveis. Para tal, a agência envia delegados para atestarem a conformidade dos processos para com a regulamentação vigente. Como exemplos de agências de verificação independentes na área *offshore* temos:

- ✓ *American Bureau of Shipping (ABS)*;
- ✓ *Bureau Veritas (BV)*;
- ✓ *Det Norske Veritas (DNV)*;
- ✓ *Germanischer Lloyd*;

ANEXO II

APLICAÇÃO DE UM *RISER* FLEXÍVEL

As plataformas e navios de produção "*offshore*" são ligados aos poços petrolíferos através de dutos rígidos ou flexíveis (Figura A2.1). A experiência da Petrobrás utilizando tubos flexíveis para extração e transporte de petróleo (e seus derivados) iniciou no ano de 1979, desde então, tais aplicações vêm crescendo constantemente, acompanhando os avanços em tecnologias de águas profundas (MARTINS, 2008).



Figura A2.1: Sistemas de produção de petróleo "*offshore*" (da esquerda para a direita temos: Plataforma fixa, Navio de produção FPSO e Plataforma semi-submersível) (MARTINS, 2008).

Dependendo da aplicação, o duto flexível recebe um nome específico, porém sua estrutura é basicamente a mesma. Para o trecho de elevação, que liga a plataforma aos terminais submarinos o duto denomina-se *riser*. Para a seção que liga os poços aos terminais submarinos (*manifolds*) são chamados de *flowline*. Existem outros modelos de dutos flexíveis usados na produção marítima de petróleo, são os chamados umbilicais. Estes dutos são usados para acionar os equipamentos submersos por meio do transporte de linhas hidráulicas, elétricas e ópticas. Esta diferenciação fica clara quando se analisa o esquema representado na Figura A2.2. Em poços marítimos de média ou grande profundidade não é possível a utilização de plataformas de produção fixas. Desta forma, devido à deriva das unidades de produção flutuantes junto com as correntes marítimas, os *risers* estão em constante movimento de flexão, tração e torção (SIMÕES, 2011).

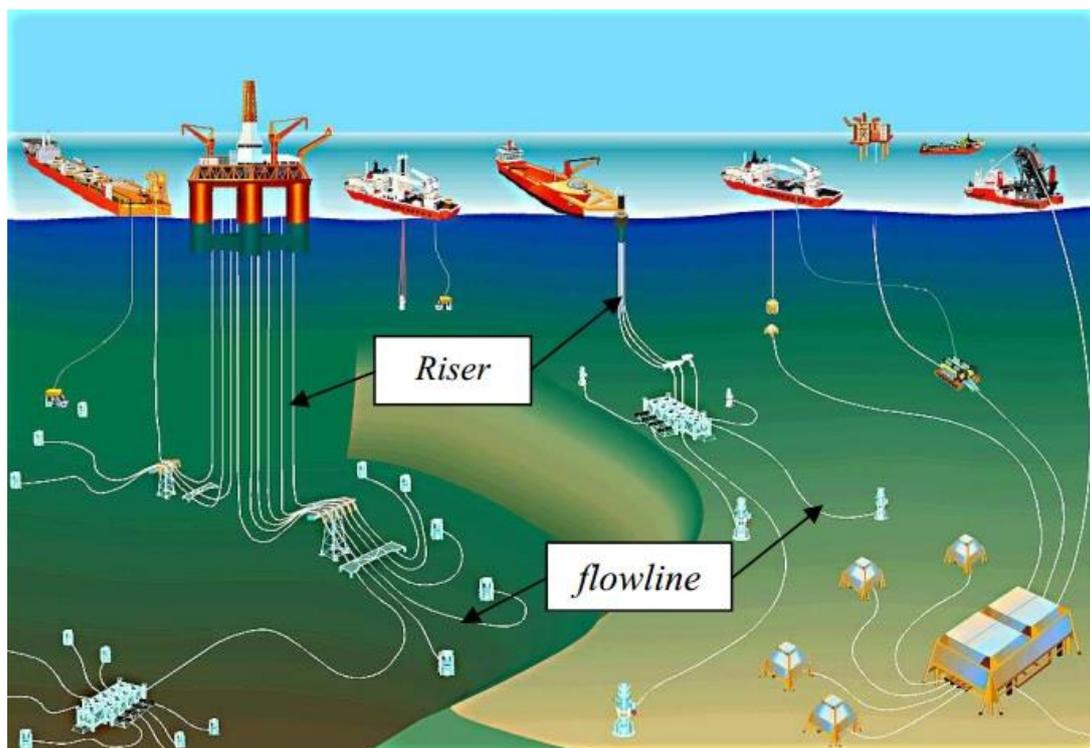


Figura A2.2 - - Esquema utilizando *risers* e *flowlines* (SIMÕES, 2011).

O crescimento tecnológico alcançado pela Petrobrás decorre, principalmente, de dois fatores (MARTINS, 2008):

- ✓ Os dutos flexíveis são estruturas complacentes, que podem ser utilizados em conexões permanentes entre o sistema de produção e instalações submarinas que apresentem movimento relativo;
- ✓ Os dutos flexíveis podem ser fabricados em grandes comprimentos e estocados em carretéis (figura A2.3) ou em navios de transporte, simplificando os processos de transporte e instalação, quando comparados aos componentes rígidos.



Figura A2.3 – Cesta de armazenamento para tubos flexíveis (OCEÂNICA/ UFRJ, 2011).

APÊNDICE A

SOBRE O AR

Retirado (Apêndice A e B) do meu Trabalho de Conclusão do Curso (Monografia) de Física, “*Pedagogia do estímulo motivacional aplicada em textos sobre Física*”. Fundação Técnico Educacional Souza Marques (FTESM) - Monografias - Rio de Janeiro, 2013.

Os corpos celestes para reterem uma atmosfera precisam ter uma determinada massa. Na lua isso não é possível, pois sua massa é pequena. É essa atmosfera que irá determinar a cor do céu. Portanto, o céu lunar é preto. Na Terra, as moléculas da atmosfera dispersam a luz solar, sendo que a radiação com comprimento de onda menor é mais espalhada. Assim, a luz de tonalidade azul (comprimento de onda menor) será mais espalhada e o céu aparecerá azul. Nos finais de tarde, a luz atravessa um caminho maior na atmosfera, até chegar aos nossos olhos, provocando o aparecimento das cores vermelhas, laranjas e amarelas.

A atmosfera é um sistema dinâmico. A sua movimentação se faz de uma região de alta pressão para uma de baixa pressão (vento). Devido à rotação da Terra o movimento das moléculas de ar no hemisfério norte é diferente à do hemisfério sul. O rodopio de um furacão no hemisfério norte é anti-horário e no hemisfério sul é no sentido horário.

O ar atmosférico é uma mistura de gases (ar seco) e o vapor de água. Os principais gases que compõem o ar seco são o nitrogênio (78%) e o oxigênio (21%). Esses gases exercem uma determinada pressão sobre todas as coisas na Terra. A tabela A.1 descreve em maiores detalhes a composição do ar atmosférico.

Tabela A.1 – Composição da atmosfera (amostra isenta de água), por volume.

Gás	Volume
Nitrogênio (N ₂)	780.840 ppmv (78,084%)
Oxigênio (O ₂)	209.460 ppmv (20,946%)
Argônio (Ar)	9.340 ppmv (0,9340%)
Dióxido de carbono (CO ₂)	390 ppmv (0,0390%)
Neônio (Ne)	18,18 ppmv (0,001818%)
Hélio (He)	5,24 ppmv (0,000524%)
Metano (CH ₄)	1,79 ppmv (0,000179%)
Criptônio (Kr)	1,14 ppmv (0,000114%)
Hidrogênio (H ₂)	0,55 ppmv (0,000055%)
Óxido nitroso (N ₂ O)	0,3 ppmv (0,00003%)
Monóxido de carbono (CO)	0,1 ppmv (0,00001%)
Xenônio (Xe)	0,09 ppmv (9 x 10 ⁻⁶ %)
Ozônio (O ₃)	0,0 a 0,07 ppmv (0% a 7 x 10 ⁻⁶ %)
Dióxido de nitrogênio (NO ₂)	0,02 ppmv (2 x 10 ⁻⁶ %)
Iodo (I)	0,01 ppmv (10 ⁻⁶ %)
Amônio (NH ₃)	traços
Gases não incluídos na alta atmosfera (amostra isenta de água):	
Vapor de água (H ₂ O)	~0.40% em toda a atmosfera, normalmente entre 1% - 4% na superfície

ppmv: partes por milhão por volume (nota: a fração de volume é igual à fração molar para apenas gases ideais)

APÊNDICE B

SOBRE A ÁGUA

Em quase toda cultura humana, existe uma explicação para a formação do universo e da vida. Com o desenvolvimento da ciência, uma explicação mais plausível foi se desenvolvendo, até que uma teoria surgisse: A teoria do *Big Bang*. O Universo surgiu de um ponto (singularidade) e tudo que existe depende da criação dos elementos químicos que ali foram criados, que são: o hidrogênio, o hélio, o deutério e o lítio¹. Cerca de 73% do universo visível é composto de hidrogênio, 25% de hélio e os restantes 2% dos outros elementos químicos. Assim, o hidrogênio e hélio respondem por, aproximadamente, 98% de todos os átomos do universo.

Com a expansão do universo, as estrelas e as galáxias foram surgindo. Devido à alta pressão das estrelas, o processo de fusão dos hidrogênios torna-se possível. Elementos químicos leves são produzidos em estrelas comuns (até o ferro), mas elementos químicos mais pesados só são possíveis nas estrelas chamadas de supernovas².

Portanto, os elementos químicos que formam a água têm a sua origem no início do universo (H) e depois com a formação das estrelas (O). Com a união desses elementos formou-se a água, que com suas particularidades, possibilitou a vida. É curioso que o hidrogênio é um gás muito perigoso, altamente inflamável e o oxigênio (o fogo precisa dele) é necessário para aumentar a combustão (alto poder de oxidação). Ainda mais curioso: O oxigênio é o elemento vital para a respiração celular e a água apaga o fogo. Mais curioso ainda: Da união deles, depende a vida.

A tabela B.1 descreve a composição da água do mar e do rio fazendo uma comparação entre elas. Posteriormente a tabela B.2 e B.3 descrevem a composição da água do mar.

¹ O lítio da graxa dos automóveis só foi produzido no início do *Big Bang*. Levamos, assim, um pedaço da história cósmica a cada dia quando dirigimos.

² Na explosão de uma supernova, o seu brilho chega a 100 vezes mais do que o brilho total de todas as outras estrelas da galáxia de onde ela explodiu.

Tabela B.1 – Comparação entre os principais elementos contidos nas águas do mar x águas de rios.

Componente	Água do rio (%)	Água do mar (%)
HCO ₃	48,6	0,41
SO ₄	9,3	7,68
Cl	6,5	55,05
Ca	12,5	1,16
Mg	3,4	3,69
Na	5,3	30,61
K	2,0	1,10
Fe	0,6	<
SiO ₂	11,0	<
Sr, H ₃ , BO ₃ , Br	<	0,30
Cátions		
Oceanos – Na⁺ > Mg⁺⁺ > Ca⁺⁺		
Rios – Ca⁺⁺ > Na⁺ > Mg⁺⁺		
Ânions		
Oceanos – Cl⁻ > SO₄⁻ > HCO₃⁻		
Rios – HCO₃⁻ > SO₄⁻ > Cl⁻		

MASON (1971)

Tabela B.2 – Componentes da água do mar.

<ul style="list-style-type: none">• Água (96,5 %)
<ul style="list-style-type: none">• Sais dissolvidos (35 ‰ ou 3,5 %) <p>Cl⁻ (cloreto) – 56 % Na⁺ (sódio) – 28 % SO₄⁻ (sulfato) – 8 % Mg²⁺ (magnésio) – 4 % Ca²⁺ (cálcio) – 1,5 % K⁺ (potássio) – 1% HCO₃⁻ (bicarbonato) – 0,5 % Todos os outros íons – 1%</p>
<ul style="list-style-type: none">• Gases dissolvidos <p>N₂, O₂, CO₂, He, Ar</p>

Libes (1992)

Tabela B.3 – Composição Química da água do mar (em ordem de abundância)

Categoria	Exemplos	Faixa de concentração
Íons Maiores	Cl ⁻ , Na ⁺ , Mg ²⁺ , SO ₄ ²⁻ , Ca ²⁺ , K ⁺	nM
Íons Menores	HCO ₃ ⁻ , Br ⁻ , Sr ²⁺ , F ⁻	µM
Gases	N ₂ , O ₂ , Ar, CO ₂ , N ₂ O, (CH ₃) ₂ S, H ₂ S, H ₂ , CH ₄	nM a mM
Nutrientes	NO ₃ ⁻ , NO ₂ ⁻ , NH ₄ ⁺ , PO ₄ ³⁻ , H ₄ SiO ₄	µM
Metais Traço	Ni, Li, Fe, Mn, Zn, Pb, Cu, Co, U, Hg	< 0,05 µM
Compostos Orgânicos dissolvidos	Aminoácidos, Ácidos húmicos	ng/L a mg/L
Colóides	espuma marinha, flocos	≤ mg/L
Material Particulado (Inorgânico e Orgânico)	areia, argila, carapaças, tecidos mortos, organismos vivos, fezes	µg/L a mg/L

Libes (1992)