Universidade Federal
do Rio de Janeiro
Escola Politécnica

MONITORAMENTO DE VAZÃO EM UNIDADES DE HIDROTRANSPORTE DE MINÉRIO EMPREGANDO ESPALHAMENTO GAMA E TÉCNICA DE "CROSS-CORRELATION"

Umberto Cassará de Castellammare Scott Siciliano

Projeto de Graduação apresentado ao Curso de Engenharia Metalúrgica da Escola Politécnica, Universidade Federal do Rio de Janeiro, como parte dos requisitos necessários à obtenção do grau de Engenheiro.

Orientadores: Giselle de Mattos Araújo
Luís Eduardo Barreira Brandão

Rio de Janeiro
Agosto de 2014.

MONITORAMENTO DE VAZÃO EM UNIDADES DE HIDROTRANSPORTE DE MINÉRIO EMPREGANDO ESPALHAMENTO GAMA E TÉCNICA DE "CROSS-CORRELATION"

Umberto Cassará de Castellammare Scott Siciliano

PROJETO FINAL SUBMETIDO AO CORPO DOCENTE DO DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA METALÚRGICA E DE MATERIAIS DA ESCOLA POLITÉCNICA DA UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO DE JANEIRO COMO PARTE DOS REQUISITOS NECESSÁRIOS PARA A OBTENÇÃO DO GRAU DE ENGENHEIRO METALÚRGICO

Examinado por:

Prof.ª Giselle de Mattos Araújo, D.Sc. (orientadora)
DMM/POLI/UFRJ

Dr. Luís Eduardo Barreira Brandão, D.Sc. (co-orientador)
IEN/CNEN

Prof. Achilles Junqueira Bourdot Dutra, D.Sc.
DMM/POLI/UFRJ

Dr. César Marques Salgado, D.Sc.
IEN/CNEN

RIO DE JANEIRO, RJ – BRASIL
AGOSTO de 2014.

Siciliano, Umberto Cassará de Castellammare Scott

Monitoramento de vazão em unidades de hidrotransporte de minério empregando espalhamento gama e técnica de “Cross-Correlation” / Umberto Cassará de Castellammare Scott Siciliano. – Rio de Janeiro, 2014.

X, 97: il.; 29,7 cm.

Orientadora: Giselle de Mattos Araújo

Projeto de Graduação – UFRJ/ Escola Politécnica / Curso de Engenharia Metalúrgica, 2014.

Referências Bibliográficas: p. 90-96.

1. INTRODUÇÃO. 2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA. 3. MINERODUTO. 4. FUNDAMENTOS TEÓRICOS. 5. METODOLOGIA. 6. MATERIAIS E MÉTODOS. 7. RESULTADOS E DISCUSSÃO. 8. CONCLUSÕES. 9. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS. 10. GLOSSÁRIO.

I. Araújo, Giselle de Mattos *et al*. II. Universidade Federal do Rio de Janeiro, Escola Politécnica, Curso de Engenharia Metalúrgica. III. Título.

“Porque para todo propósito há tempo e modo.”

Eclesiastes 8:6

AGRADECIMENTOS

Primeiramente gostaria de agradecer àquela Energia positiva que nunca nos permite desisitir e que sempre esteve presente na minha vida, a qual muitos denominam Deus.

Aos meus pais: Maria Manuela Teresa Cassará de Castellammare e Siciliano e Luiz Fernando Scott Siciliano, pois a minha existência só foi possível graças ao amor deles.

Aos meus irmãos Giuliana, Gisella e Fernando.

À orientadora, Professora Giselle de Mattos Araújo, por ter acreditado no trabalho e pela paciência e bom humor que sempre me atendia quando a procurava.

Aos pesquisadores do IEN, em especial ao co-orientador, Dr. Luís Eduardo Barreira Brandão, por ter auxiliado no desenvolvimento do trabalho e por ter permitido a utilização do Laboratório de Traçadores Radioativos para a realização de toda a etapa experimental.

Aos colegas do curso de Engenharia Metalúrgica e de Materiais, principalmente Marco Antônio Chaves Lima, o qual sempre esteve disposto a ajudar compartilhando todo seu conhecimento adquirido ao longo do curso e à Luciana Ramos Nobre que apesar da distância sempre mostrou-se presente durante toda essa trajetória.

Resumo do Projeto de Graduação apresentado à Escola Politécnica/UFRJ como parte dos requisitos necessários para a obtenção do grau de Engenheiro Metalúrgico.

Monitoramento de Vazão em Unidades de Hidrotransporte de Minério Empregando Espalhamento Gama e Técnica de “Cross-Correlation”

Umberto Cassará de Castellammare Scott Siciliano
Agosto/2014

Orientadores: Giselle de Mattos Araújo
Luís Eduardo Barreira Brandão

Curso: Engenharia Metalúrgica

O hidrotransporte pode ser definido como um transporte hidráulico de partículas sólidas em tubos, geralmente cruzando longas distâncias usando água como meio transportador. É bem reconhecido e praticado no campo de processamento de minérios.

A proposta desse trabalho foi desenvolver uma metodologia que empregasse radiação gama e técnica “Cross-Correlation” para medir a velocidade das pelotas no interior de um tubo, para simular a operação de um mineroduto.

Uma unidade experimental, denominada Unidade Estática, foi projetada e construída, e no seu interior foram simulados diferentes tipos de fluxos bifásicos. Um protótipo de um medidor de fluxo bifásico foi instalado externamente ao tubo, formado por dois sistemas de medida independentes, cada um composto por uma fonte de radiação gama de ^{241}Am (59,62 keV de energia) e um detector cintilador NaI (1 x 1 ”). Estes sistemas estavam localizados no mesmo plano e separados por uma distância de 18,0 cm. Como pelotas, foram produzidos corpos de prova de formato e composição variada para se obter um espectro de densidades para testar a metodologia e a Unidade Estática.

Em todos os testes, os resultados mostraram que o uso da densitometria gama associada a medida do Coeficiente de “Cross-Correlation” entre os sinais de dois detectores permitiu que fosse calculado o transiente de tempo entre entre esses dois sinais, e assim medir a velocidade de arraste da pelota.

Palavras-chave: hidrotransporte, minérios, radiação gama, “Cross-Correlation”, pelota.

Abstract of Undergraduate Project presented to POLI/UFRJ as a partial fulfillment of the requirements for the degree of Engineer.

Flow Monitoring in Hydrotransport Units of Ore Using Gamma Scattering and "Cross-Correlation" Technique

Umberto Cassará de Castellammare Scott Siciliano

August/2014

Advisors: Giselle de Mattos Araújo

Luís Eduardo Barreira Brandão

Course: Metallurgical Engineering

The hydrotransport can be defined as a hydraulic transport of solid particles in pipelines, generally crossing long distances using water as carrier. Is well recognized and practiced in the field of ore processing.

The purpose of this research was to develop a methodology employing gamma radiation and Cross Correlation technique to measure the velocity of pellets inside a pipeline, to simulate the operation of a slurry pipeline.

A experimental unit, denomined Static Unit, was projected and built, and inside of it were simulated different types of biphases flows. A prototype of biphase flowmeter was installed outside of pipe, formed by two independent measurement systems, each one composed by a gamma source of ^{241}Am (59.62 keV energy) and NaI scintillator detector (1 x 1 ”). These systems were located in the same plane and separated by 18.0 cm of distance. As pellets, were produced specimens of format and composition varied for obtain a spectrum of densities to test the methodology and the Static Unit.

In all tests, results showned that the use of gamma densitometry associated with the measurement of Cross Correlation Coefficient between the signals of the two detectors allowed the calculation of the transient time between those two signals, and thereby measuring the drift velocity of the pellet.

Keywords: hydrotransport, ore, gamma radiation, Cross Correlation, pellet.

SUMÁRIO

1 - INTRODUÇÃO.....1
1.1 - Considerações Iniciais.....1
1.1.1 - Motivação.....1
1.1.2 - Objetivos.....2
1.1.3 - Escopo do Trabalho.....2
1. 2 - A Indústria Extrativa Mineral.....3
1.3 - Transporte.....4
1.3.1 - Aquaviário.....5
1.3.2 - Rodoviário.....6
1.3.3 - Aeroviário.....6
1.3.4 - Ferroviário.....6
1.3.5 - Dutoviário.....7
1.4 - Integração entre Modais.....9
1.4.1 - Tendências da Intermodalidade no Brasil.....10
1.5 - Cenário Atual dos Transportes no Brasil.....10
1.6 - O Transporte de Minério de Ferro no Brasil.....11
1.6.1 - Portos Brasileiros.....11
1.6.2 - Rodovias Brasileiras.....12
1.6.3 - Ferrovias Brasileiras.....13
1.6.4 - Malha Dutoviária Brasileira.....13
1.7 - Técnica de medida de vazão por Cross-Correlation.....14

2 - REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....16
2.1 - Características da polpa.....16
2.1.1 - Cálculo da Concentração Média de Sólidos na Mistura.....16
2.1.2 - Massa Transportada x Vazão de polpa.....17
2.1.3 - Granulometria.....17
2.1.4 - Corrosão e Abrasão.....19
2.2 - Conceitos Hidrodinâmicos.....19
2.2.1 - Tipos de Fluxos.....19
2.2.2 - Velocidade Crítica e Velocidade Crítica de Sedimentação.....20
2.2.2.1 – Determinação da Velocidade Crítica de Sedimentação22
2.2.3 - Perdas de Carga.....24
2.2.3.1 - Perdas de Carga Lineares.....25
2.2.3.2 - Perdas de Carga Singulares.....25

2.2.4 - Fenômenos de Transientes.....26
2.2.5 - Regimes de Escoamentos.....26

3 - MINERODUTO.....29
3.1 - A Construção de um Mineroduto.....29
3.1.1 - Áreas de Influência.....30
3.1.1.1 - Área Diretamente Afetada.....30
3.1.2 - Análise da Implantação.....30
3.2 - Sistema Operacional do Mineroduto.....31
3.2.1 - Controle.....31
3.2.2 - Sistemas de Comunicação.....32
3.2.3 - Monitoramento para Detecção de Vazamentos.....32
3.2.4 - Sistema Hidráulico.....33
3.2.5 - Operação do Mineroduto.....33
3.2.6 - Manutenção do Mineroduto.....33
3.3 - Impactos Negativos Gerados pela Implantação e Reparo do Mineroduto34
3.4 - Principais Minerodutos Brasileiros.....34
3.4.1 - SAMARCO.....35
3.4.2 - Fosfértil.....36
3.4.3 - Anglo Ferrous Brazil.....36

4 - FUNDAMENTOS TEÓRICOS.....38
4.1 - Radiações Eletromagnéticas.....38
4.2 - Interação da Radiação Ionizante com a Matéria.....40
4.2.1 - Interações de Fótons com a Matéria.....42
4.3 - Atenuação de Radiação Gama.....46
4.4 - Detectores Cintiladores.....48
4.4.1 - Espectroscopia com Detectores Cintiladores.....51

5 - METODOLOGIA.....54
5.1 - Cálculo da Velocidade de Arraste pela Técnica da Medida da Função "Cross-Correlation".....53
5.1.1 - Métodos para Cálculo da Função Cross-Correlation.....55
5.1.1.1 - Cálculo da FCC pelo Método Direto.....56
5.1.1.2 - Cálculo da FCC pelo Método da Transformada de Fourier.....58
5.2 - Técnica da Densitometria Gama para o Cálculo da Velocidade de Arraste de Pelotas.....60

5.3 - Simulação do Deslocamento de Pelotas de Minério no Interior de um Mineroduto.....61

6 - MATERIAIS E MÉTODOS.....63
6.1 - Sistema de Aquisição de Dados.....63
6.2 - Confecção de Corpos de Prova.....65
6.3 - Unidade de Simulação de Mineroduto.....69
6.4 - Simulação do Deslocamento de Pelotas de Minério Utilizando Pulso Quadrado como Sinal no Detector Cintilador.....71

7 - RESULTADOS E DISCUSSÃO.....74
7.1 - Avaliação do Método Matemático para Medida da Correlação dos Sinais dos Detectores.....74
7.1.1 - Correlator Original.....75
7.1.2 - Correlator Modificado.....76
7.1.3 - Interferência do Ruído Eletrônico na Correlação.....78
7.2 - Determinação da Velocidade de Arraste de Pelotas de Minério.....80
7.2.1 - Teste Experimental com P1: Pelota Esférica de Cimento de 3.0 cm.....80
7.2.2 - Teste Experimental com P2: 7 Pelotas Esféricas de 2.0 cm.....82
7.2.3 - Teste Experimental com P3: 12 Pelotas Esféricas de 1.0 cm.....84
7.2.4 - Teste Experimental com P4: 6 Pelotas Cúbicas de 2.0 cm de Aresta.....85
7.2.5 - Teste Experimental Simulação de Leito Móvel com 9 Pelotas P2 e 2000 Esferas de Acrílico.....87

8 - CONCLUSÕES.....89

9 - REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....90

10 - GLOSSÁRIO.....97

1 - INTRODUÇÃO

1.1 - Considerações Iniciais

O minério de ferro é a principal matéria-prima da indústria siderúrgica para fabricação de aço. Assim, a demanda por minério de ferro é fortemente dependente do setor siderúrgico, sendo este influenciado diretamente pela economia mundial. O aumento da demanda por aço na China fez com que a oferta de minério de ferro no mercado interno chinês não fosse suficiente para suprir a demanda, levando a China a recorrer à importação de aço para suprir sua necessidade de produção industrial.

Este novo cenário motivou o aumento da produção de minério de ferrro pelos maiores exportadores mundiais desse produto, dentre eles o Brasil. Portanto, a expansão e o aprimoramento da capacidade de transporte tornaram-se de grande importância para atender a expansão do mercado de aço. [1]

1.1.1 - Motivação

No ambiente industrial, a medição precisa do fluxo de massa de um determinado produto é um dado essencial para o controle adequado das diferentes operações e processos que estão ocorrendo. Uma das condições essenciais é que a técnica de medição empregue medidores não invasivos, para serem efetuadas análises sem influenciar na operação normal da instalação, bem como reduzir o desgaste provocado pelo contato abrasivo das pelotas de mineral com o dispositivo de medida.

Para o caso da medida da fração de massa de sólidos em mineroduto, geralmente são empregados medidores de fluxo bifásico que empregam técnicas ultrassônicas, mas devido à variação das características do meio (densidade, tamanho das pelotas, perfil de fluxo) as sondas têm que ser periodicamente calibradas, pois tem um resultado fortemente dependente no valor da densidade média do fluido que se desloca no interior do duto. Essa limitação não ocorre quando o dispositivo de medida utiliza a intensidade da radiação gama espalhada como sinal de medida.

À medida que ocorrem variações nas proporções entre a fase sólida e líquida, a intensidade do sinal da radiação gama espalhada será inversamente proporcional à concentração de pelotas de mineral que estão se deslocando no interior do mineroduto. Em todo o ciclo da indústria de mineração, desde a etapa de extração do mineral até o processamento final, é um campo natural para aplicação de técnicas nucleares, principalmente por serem técnicas não invasivas e por possibilitarem medidas com resultados com alta precisão e confiabilidade. Em todo o mundo, diversos trabalhos ilustram o sucesso da aplicação dessas metodologias na avaliação

do tempo de residência de moinhos, em medidas da eficiência de unidades de floculação e na medida de vazão em dutos de transporte de diferentes tipos de materiais.

A grande vantagem desta técnica é a alta sensibilidade de detecção dos sistemas utilizados, pois permite o uso de fontes radioativas seladas e com baixas intensidades, minimizando o potencial de risco radiológico para a saúde dos trabalhadores ocupacionalmente expostos; e também não provocar dano ou contaminação radiológico-química ao equipamento e ao meio ambiente.

Atualmente uma das maiores preocupações da indústria de mineração, principalmente nas atividades de transporte e processamento de minérios, está na segurança e confiabilidade das operações. Uma das áreas mais promissoras é o desenvolvimento de dispositivos para medidas de vazão mássica em minerodutos. Estas unidades são compostas por dutos conectados entre si onde o transporte do material é realizado por bombas possantes capazes de impulsionar o material sólido (em pelotas ou em polpa) utilizando um fluido portador (água no caso de minérios ou então ar no caso de cereais, fertilizantes e cimento). [2]

1.1.2 – Objetivos

Objetivo Principal:

Desenvolvimento de um dispositivo não invasivo empregando fonte de radiação gama e detectores cintiladores para medidas da velocidade de arraste de pelotas de minério em um mineroduto

Objetivos Secundários:

- Estudo e otimização da geometria de contagem para o sistema fontes-detectores por modelagem matemática utilizando método de Monte Carlo.
- Projeto e construção de um dispositivo para testes com fase aquosa estática para simulação de transporte de sólidos em um mineroduto.
- Desenvolvimento de metodologia para a medida da velocidade de arraste de pelotas sólidas em meio aquoso usando a técnica de medida de “Cross-Correlation” de sinais de transmissão da radiação gama de dois detectores cintiladores.

1.1.3 - Escopo do Trabalho

O presente trabalho envolve o desenvolvimento de um dispositivo capaz de medir em tempo real e de forma precisa, a velocidade de arraste de pelotas de minério que percorrem um

mineroduto, contribuindo para a operação segura deste tipo de instalação industrial. Inicialmente será apresentada a situação do transporte de minério de ferro no Brasil

A forma usual de escoamento do minério de ferro no Brasil é por meio de trens cargueiros. Entretanto a malha ferroviária brasileira é insuficiente para atender o escoamento da atual produção de minério de ferro, necessitando assim de investimentos de expansão desse setor, ou então com a conciliação de outra forma de transporte. Dessa forma surge como alternativa ao transporte dos produtos das indústrias extrativas metalúrgicas: o hidrotransporte. No entanto esse transporte deve ser conciliado com algum outro modal a fim de minimizar custo e possibilitar a entrega ao local de destino.

1.2 – A indústria Extrativa Mineral

O minério de ferro é um recurso abundante em todo o mundo, entretanto as melhores jazidas estão localizadas em alguns países. As reservas brasileiras possuem o maior teor de ferro contido: em geral maior que 60%. Na Tabela 1.1 tem-se a comparação da produção no Brasil em relação ao mundo.

Tabela 1.1: Posições do Brasil no *ranking* mundial de produção e reserva de minérios. [3]

Minerais	Produção Brasileira	Prosicão no Ranking	Resevas Brasileiras	Posição no Ranking
Bauxita	14%	3º	6,8%	5º
Cobre	2%	5º	2%	13º
Rochas Ornamentais	7,7%	3º	5,6%	6º
Ouro	2,3%	12º	3,3%	9º
Minério de Ferro	17%	2º	11%	5º
Caulim	6,8%	5º	28%	2º
Manganês	20%	2º	1,1%	6º
Nióbio	98%	1º	98%	1º
Tantalita	28%	2º	50%	1º
Estanho	4,1%	5º	13%	3º
Zinco	2,4%	12º	0,85%	6º

As reservas de minério do Brasil, além de volumosas, apresentam características naturais favoráveis, além disso, são de fácil lavra e possibilitam a alta produtividade a custos baixos. As reservas brasileiras estão localizadas principalmente no Quadrilátero Ferrífero (Minas Gerais) e na Serra dos Carajás (Pará).

A produção em larga escala de minério encontra-se em poucos países. Atualmente a China é a maior produtora mundial. A Tabela 1.1 apresenta dados referentes à reserva e produção de

minério brasileiro, entretanto devido à grande expansão da indústria siderúrgica chinesa, a China vem recorrendo a importações para atender a grande demanda. O Brasil então exporta grande parte da sua produção de minério, conforme apresentado na Figura 1.1

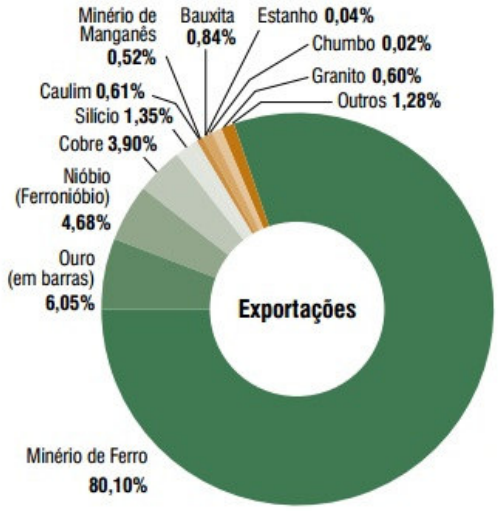


Figura 1.1 – Gráfico que ilustra a exportação de minérios brasileiros. [3]

No cenário mundial, o Brasil apresenta posição de destaque, ocupando a segunda posição em exportação de minério de ferro. A excelente infraestrutura das indústrias extrativas brasileiras, a proximidade do mercado europeu, as associações com as empresas compradoras e a produção elevada, são vantagens para a valorização do minério brasileiro.

Os principais formadores do custo dos minérios de ferro são: mineração, tratamento e transporte. Entretanto, os custos de transporte interno até o porto de embarque e o frete transoceânico são os que mais oneram o preço final do produto. Cabe ressaltar que este preço não obedece à lei da oferta e da demanda, mas sim à imposição das grandes siderúrgicas mundiais. [4]

1.3 - Transporte

O transporte é a atividade primária considerada pela maioria das empresas como a mais importante, já que em média, representa 60% dos custos. Esses custos estão associados às características do produto transportado. Assim quanto menor o valor agregado da mercadoria e maior o volume, maior será a participação no custo total, portanto a seleção de um modal de transporte pode ser usada para criar uma vantagem competitiva do serviço, pois reduz em grande parte o custo.

Quanto mais desigual for a distribuição dos recursos, maior atenção deverá ser dada ao planejamento do transporte. Para organizar um sistema de transporte para entrega de produtos é preciso conhecer: os fluxos do produto nas diversas ligações da rede; o nível de serviço atual e o desejado; as características ou parâmetros sobre a carga; os tipos e características dos equipamentos disponíveis.

Em relação aos modais, há cinco características para se classificar o melhor transporte: velocidade, disponibilidade, confiabilidade, capacidade e freqüência. A seguir esses pontos são detalhados para maior clareza:

- **Velocidade:** é o tempo decorrido em dada rota;
- **Disponibilidade:** é a capacidade que cada modal tem de atender às entregas;
- **Confiabilidade:** reflete a habilidade de entregar no prazo determinado;
- **Capacidade:** é a possibilidade do modal de transporte lidar com tamanho e tipo de carga;
- **Frequência:** é caracterizada pela quantidade de movimentações programadas.

1.3.1 – Aquaviário

É o mais antigo modal de transporte e tem a capacidade de transportar grandes quantidades de material em um único frete como sua principal característica. Adequado para o transporte de grandes volumes desde que o tempo de trânsito não seja um fator de relevância. Utilizado principalmente para o transporte de granéis, líquidos, produtos químicos, carvão, cereais e bens de alto valor em *containers*. Este tipo de transporte é subdividido em duas formas:

- **Cabotagem:** que é navegação realizada entre portos ou pontos do território nacional, utilizando a via marítima ou entre vias navegáveis interiores;
- **Navegação de longo curso:** realizada entre portos nacionais e estrangeiros.

Em relação aos custos, apresenta custo fixo médio (navios e equipamentos) e custo variável baixo (capacidade de transportar grandes quantidades). Apresenta o mais baixo custo em relação aos outros modais.

Apresenta como vantagens: a capacidade de transportar mercadoria volumosa e pesada e o fato dos custos de perdas e danos serem considerados baixos. Suas principais desvantagens são: existência de problemas de transporte no porto, lentidão, forte influência das condições meteorológicas.

1.3.2 - Rodoviário

A principal característica deste modal é sua alta flexibilidade, sendo assim é recomendado para pequenos deslocamentos, podendo atingir praticamente todos os pontos do território nacional. Utilizado para entrega de produtos acabados e semi-acabados. No entanto apresenta preços de frete mais elevados do que outros modais, logo é indicado para mercadorias de alto valor ou perecíveis.

No que diz respeito aos custos, apresenta custos fixos baixos (pois as rodovias estabelecidas são construídas com fundos públicos), porém seu custo variável é médio (combustível, manutenção, etc.).

As vantagens deste modal residem na possibilidade de transporte integrado "porta-a-porta" e de adequação aos tempos pedidos. Porém apresenta como desvantagem a possibilidade de transportar somente pequenos volumes de cargas, adicionando-se ainda que um grande fluxo de veículos pesados trafegando através das vias levaria a uma enorme sobrecarga aos sistemas rodoviários, além de uma maior emissão de poluentes na atmosfera devido à queima de combustível fóssil.

1.3.3 – Aeroviário

Este modal diferencia-se dos demais por apresentar como maior vantagem a alta velocidade de transporte para médias e grandes distâncias. Por outro lado, seu elevado custo inviabiliza seu uso quando o fator tempo não for de grande relevância para o transporte em questão.

Este tipo de transporte é empregado principalmente para cargas de alto valor unitário, como por exemplo, artigos eletrônicos, relógios e alta moda. As vantagens deste modo são: a alta velocidade alcançada, segurança (menor probabilidade de roubos, danos e extravios) e redução de custo com estoque. Entretanto suas principais desvantagens são: custo alto do frete, tempos de coleta/entrega e dimensões físicas dos porões de transporte dos aviões.

1.3.4 - Ferroviário

Este modo apresenta elevados custos fixos (equipamentos, terminais e vias férreas). Porém, seu custo variável é baixo. Como exemplos de meios de transporte ferroviário pode-se citar: transporte com vagões, *containers* ferroviários e transporte ferroviário de semi-reboques rodoviário (conhecido também por *piggyback*).

É amplamente utilizado para o transporte de grandes volumes de bens minerais, mas isto implica na existência de linha férrea e disponibilidade de equipamentos para carga/descarga e da aquisição de locomotivas e vagões para o transporte. [5]

1.3.5 – Dutoviário

A utilização deste modal relaciona-se principalmente ao transporte de matérias-primas para outros processos, tais como: petróleo, gás natural, produtos químicos, minérios, etc. Apresenta alto custo fixo de implantação, porém reduzido custo de operação.

Atualmente se apresenta como uma das formas mais econômicas de transporte para grandes volumes, quando comparado com os modais ferroviário e rodoviário. Uma característica bem peculiar de uma dutovia diz respeito à sua natureza, já que pode operar 24 horas por dia, sete dias por semana, necessitando de pausas somente para manutenções periódicas e/ou emergenciais.

O transporte de cargas neste modal ocorre no interior de uma linha de tubos, mais conhecidos por dutos, e o movimento dos produtos se dá por pressão ou arraste por meio de um fluido. O sistema por gravidade apresenta a principal vantagem de não necessitar de força motriz mecânica, fazendo com que não seja necessário utilizar energia, porém possui a limitação de transportar apenas produtos fluidos pouco viscosos.

Os principais elementos que constituem uma dutovia são: os terminais, equipamentos de propulsão do produto (bombas/compressores), tubos e válvulas de bloqueio. O esquema de uma dutovia tradicional é mostrado na Figura 1.2.

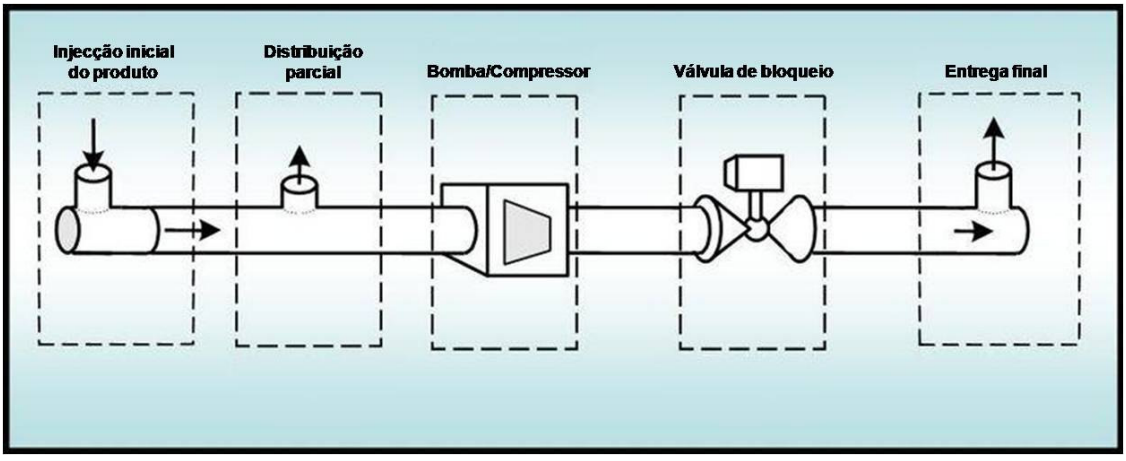


Figura 1.2 – Principais componentes de uma dutovia. [6]

A classificação das dutovias pode ser feita por sua localização em relação ao meio, podendo o mineroduto ser: enterrado, aéreo, submarino, flutuante. Pode ser também classificado por sua rigidez: rígido ou flexível - Pela temperatura de operação: normal ou aquecido - e por fim, pelo produto que transporta: oleoduto, gasoduto e mineroduto.

A principal vantagem deste modal é que o veículo que efetua o transporte é fixo enquanto que o produto a ser transportado é o que se desloca, logo não há necessidade de embalagens para o transporte, o que reduz o custo do frete. Entretanto como principal desvantagem não apresenta flexibilidade, já que há uma limitação no número de produtos que podem utilizar este modal. Somado a isso há também:

- **Lentidão na movimentação dos produtos:** o que pode inviabilizar seu uso para o transporte de perecíveis;
- **Inflexibilidade:** a rota de distribuição é fixa já que a posição dos dutos também o é, por esse motivo, é adequado a produtos que mantenham sua demanda restrita a locais fixos;
- **Custo fixo elevado**: decorrentes dos direitos de acesso, construção, requisitos para controle das estações e proporcionais à capacidade de bombeamento, portanto há necessidade de grande investimento de capital.

A ênfase dada na segurança (meio ambiente e garantia de suprimento) das dutovias pode tornar ainda mais oneroso o investimento necessário. Ainda assim é possível listar outros aspectos positivos:

- **Alta confiabilidade:** já que existem poucas interrupções para causar variabilidade nos parâmetros operacionais. Somado a isso, os danos e perdas de produtos são baixos;
- **Pontualidade:** o transporte por dutos cumpre prazos e horários, já que não há interferências externas devido ao clima, geografia ou trânsito;
- **Segurança:** em geral é superior a de outros modais, por isso é indicado para o transporte de produtos perigosos como etileno ou GLP. Representa também maior segurança para o meio ambiente e a população, pois os riscos de acidentes são menores;
- **Baixo custo de operação**: não há nenhum custo com mão de obra de grande importância. Por isso é o segundo modal com mais baixo custo, antecedido apenas pelo transporte hidroviário;

- **Baixo potencial de impacto ambiental**: como a energia elétrica é predominantemente empregada na operação de bombeamento, não há emissão de gases deletérios ao meio ambiente, típicos da queima de combustíveis fósseis;
- **Operação contínua:** por ser um sistema baseado em operação contínua, tem por consequência a produtividade máxima

Sistemas de supervisão e monitoramento aumentam a produtividade das dutovias e reduzem a mão-de-obra necessária. [7]

1.4 - Integração entre Modais

Geralmente a integração entre modais ocorre entre dois modais distintos, mas também pode ocorrer entre mais de dois modais. Essa iniciativa objetiva permitir uma entrega a um menor custo e a uma velocidade maior, buscando equilíbrio entre preço e serviço.

Observa-se que o termo intermodalidade era tratado do ponto de vista operacional, como a junção de diferentes modais de transporte, ou seja, os bens são condicionados em uma única unidade de carregamento (*container*), utilizando diferentes modais de transporte sucessivamente sem manuseio dos bens na mudança de um modal para outro, caracterizando o que se chama de serviço “porta-a-porta”. Já o termo multimodalidade pode ser definido como a integração entre modais, com o uso de vários equipamentos, com o manuseio dos produtos na transferência de um modal para o outro. A Figura 1.3 apresenta as diferentes integrações entre modais.

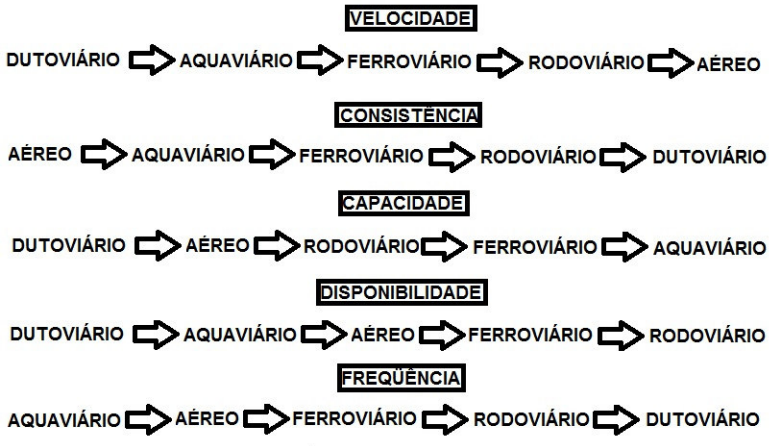


Figura 1.3 – Integração entre diversos modais, mostrando a principal vantagem de cada sequência indicada. [8]

1.4.1– Tendências da Intermodalidade no Brasil

Atualmente no Brasil utiliza-se a multimodalidade, entretanto o governo federal executa um conjunto de projetos que visam possibilitar o desenvolvimento de alternativas de transporte por mais de um modal. Espera-se que novos investimentos sejam realizados para complementar os projetos já concluídos. Ainda assim a utilização de tecnologia de informação de forma adequada é fator fundamental para o desenvolvimento de um serviço que integre os modais, para que disponibilize informações sobre o status da carga para os embarcadores/clientes.

Geralmente os tipos de produtos transportados por mais de um modal são commodities, como minério de ferro, grãos e cimento, pois já que estes produtos possuem baixo valor agregado torna-se indispensável um sistema de transporte eficiente, pois o custo de transporte é uma parcela considerável do valor destes produtos. Por exemplo: o transporte rodo-ferroviário tem como vantagens em relação ao transporte rodoviário, o custo baixo do transporte ferroviário para longas distâncias e acessibilidade do transporte rodoviário.

1.5 - Cenário Atual dos Transportes no Brasil

Atualmente, um dos principais empecilhos para o desenvolvimento da intermodalidade no Brasil está relacionado às deficientes infraestruturas de transporte e comunicação. Por esta razão o transporte brasileiro apresenta uma grande dependência do modal rodoviário (o qual apresenta o segundo custo mais elevado), como mostrado na Figura 1.4. Essa falta de estrutura na matriz de transportes do Brasil pode ser explicada pelo longo período de estatização dos portos, ferrovias e dutos, assim como subsídios ainda existentes. A melhoria de portos, ferrovias e dutovias auxiliariam na redução dos custos se novos investimentos fossem aplicados nestes modais. [9]

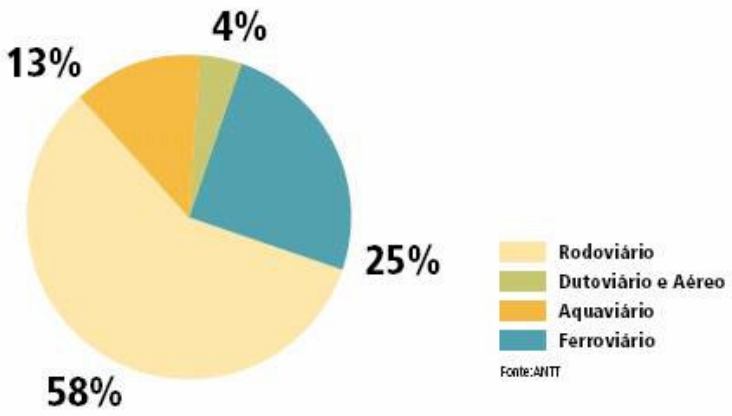


Figura 1.4 – Matriz de transporte brasileira. [10]

1.6 - O Transporte de Minério de Ferro no Brasil

É de grande importância considerar o transporte de minério no Brasil, pois representa 16% do transporte de cargas do país. Além disso, reflete drasticamente no preço do produto já que a distância da jazida mineral à usina de pelotização é maior que nos países concorrentes, fazendo com que os custos de transporte em território nacional para esse produto sejam mais elevados.

O transporte do minério de ferro no território brasileiro é realizado principalmente de forma multimodal. Destacam-se três opções de modais logísticos para transporte de minério de ferro entre a mina e as usinas de pelotização: transporte hidroviário seguido de transporte rodoviário; transporte ferroviário e transporte dutoviário (sob a forma de polpa aquosa).

1.6.1 – Portos brasileiros

A atual situação dos portos brasileiros é crítica, pois não foi dada a merecida atenção por parte dos governos e da iniciativa privada. A reformulação do transporte marítimo nacional é um fator primordial para o fortalecimento do comércio regional bem como internacional. A Figura 1.5 apresenta a proporção de movimentação de cargas nos portos brasileiros.

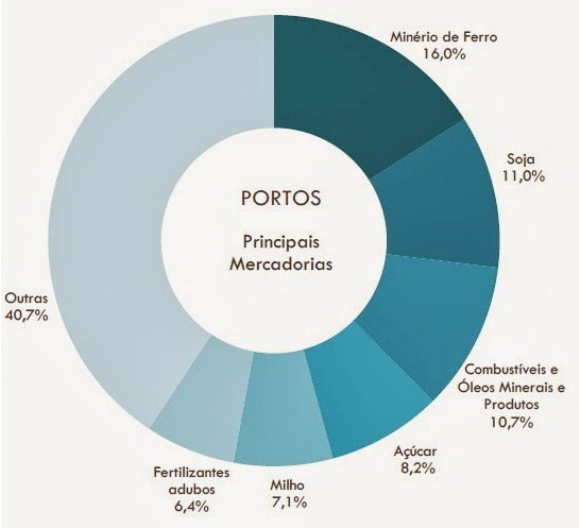


Figura 1.5 – Movimentação de carga dos portos brasileiros. [11]

Entre os principais portos que movimentam cargas ferríferas encontram-se: o porto de Tubarão (localizado no Espírito Santo), o qual realiza a maior movimentação de cargas da indústria metalúrgica extrativa ferrífera e o porto de Madeira (situado no Maranhão), sendo o segundo porto mais importante no escoamento de minério de ferro.

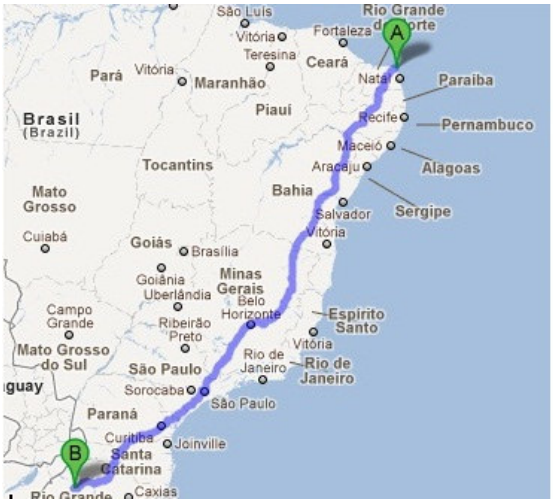
(a)

(b)

Figura 1.6 – (a) Porto de Tubarão, Espírito Santo; (b) Porto de Madeira, Maranhão. [12]

1.6.2 - Rodovias brasileiras

A utilização do modal rodoviário como única forma de transporte se mostra inviável, pois teria que haver um número muito grande de caminhões semi-pesados trafegando nas vias para o transporte do minério de ferro. Soma-se a isso, o fato que esses mesmos veículos descarregados retornariam à jazida, gerando custos adicionais, já que não haveria carga de retorno. Associado a isso temos como fator de custo adicional, o desgaste excessivo provocado pelo tráfego de caminhões, como mostrado no detalhe da Figura 1.7 (b).



(a) (b)

Figura 1.7 – (a) Mapa indicando uma das principais rodovias brasileiras: BR-101, que vai do Rio Grande do Norte (ponto A) ao Rio Grande do Sul (ponto B); (b) Situação catastrófica da BR-101 em um de seus trechos. Ano de referência: 2013. [13]

Além disso, com a implantação de pedágios nas principais vias do país, os transportadores rodoviários sofrem inevitavelmente uma pressão para manter a competitividade. Também deveria haver um aumento nos investimentos em obras de melhoria das rodovias por parte do poder público/privado, já que se encontram mal dimensionadas e conservadas para os dias atuais.

1.6.3 – Ferrovias brasileiras

Ao se analisar a extensão da malha ferroviária brasileira de cargas, mostrada em detalhe na Figura 1.8, constata-se que ela é muito pequena diante das dimensões do país e pouco utilizada devido a problemas de infraestrutura e falta de investimentos.

Figura 1.8 – Malha ferroviária brasileira, evidenciando a insuficiente estrutura para o país, sendo possível identificar estados onde ainda não foram construídas ferrovias. [14]

Sendo assim, apesar de ser menor o custo global, haveria a necessidade de revitalização da linha férrea já existente e a construção de novas. Deve ser levado em consideração também, o planejamento de construção e operação de pátios de transbordo e de ramais ferroviários para acesso ao porto, além da compra de equipamentos de carga/descarga, locomotivas e vagões. A aquisição das duas últimas se justifica, pois cada locomotiva só é capaz de realizar, em um mesmo dia, uma única viagem de ida e uma de volta, logo haveria necessidade de aumentar o número de locomotivas e vagões para aumentar a capacidade de entrega do minério. [15]

1.6.4 – Malha Dutoviária Brasileira

O investimento unitário no transporte dutoviário é inferior ao de uma ferrovia, bem como o custo operacional do sistema de transporte de polpa através de dutos, sendo aproximadamente

10 vezes inferior ao custo de transporte por vagões. O transporte dutoviario é representativo no Brasil, entretanto concentra-se em poucas empresas e tem pequena dimensão se comparado ao tamanho do território nacional, como pode ser constatado na Figura 1.9.

Figura 1.9 – Malha dutoviária brasileira, evidenciando a sua pequena dimensão se comparada à extensão do território nacional. [16]

A comparação com outros países de porte semelhante mostra que o modal é subutilizado no país, conforme pode ser observado na Tabela 1.2. [15]

Tabela 1.2 – Comparação do modal dutoviario no Brasil e nos EUA. [15]

	Brasil		EUA	
Modal	tkm (10^9)	%	ton mile (10^9)	%
Rodoviário	451	60,46	1.203	28,21
Ferroviário	156	20,91	1.546	36,26
Aquaviário	103	13,81	646	15,15
Aéreo	3	0,34	16	0,38
Dutoviário	33	4,48	853	20,00
Total	746	100,00	4.264	100,00

1.7 – Técnica de Medida de Vazão por Cross-Correlation

A idéia de processamento do sinal de um dispositivo elétrico com dado de entrada para a técnica de correlação cruzada não é recente. A definição das funções de correlação (Auto-

Correlation e Cross-Correlation) é uma teoria muito bem definida desde o inicio do século XX, mas não foi usada como metodologia de medida em sistemas industriais devido às dificuldades técnicas para aquisição/processamento/armazenagem de sinais gerados pelos dispositivos naquela época.

Atualmente, com o advento dos computadores dotados de processadores digitais (que são mais rápidos) e da possibilidade de sistemas de interface analógico/digital aquisitarem, processarem e armazenarem um número grande de dados experimentais fez o uso das técnicas de correlação para medidas da vazão de sistemas multifásicos ser tecnologicamente viável. Este campo de pesquisa tornou-se uma área de interesse de diversos grupos de pesquisa, principalmente os que são voltados para o desenvolvimento de dispositivos não invasivos de medida de vazão em tempo real para serem instalados em linhas de transporte de produtos industriais.

O princípio básico deste tipo de dispositivo é medir o transiente de tempo de uma perturbação que é transmitido entre dois pontos adequadamente espaçados ao longo da direção do fluxo. Nas duas ultimas décadas, diversos medidores de vazão que utilizam a técnica Cross-Correlation foram desenvolvidos e aplicados em diferentes campos da indústria e apesar do cálculo da função de correlação ser um processo matemático relativamente simples, como será mostrado no Capítulo 5, o projeto de um correlator para medida de vazão envolve um estudo complexo, pois para que um dispositivo possa ser utilizado ele deve apresentar:

- **Características físicas (dimensão, área de atuação e sensor de medida):** devem ser especificadas de acordo com o ambiente onde será instalado, pois a sua resposta está relacionada com a variação das densidades, tanto dos materiais que constituem os dutos como do fluido transportado;
- **Resolução, faixa de operação, sensibilidade e precisão:** devem ser especificadas, pois estas propriedades são fortemente dependentes das características físico/químicas de cada caso.

Na indústria, as medidas tradicionais de vazão usam dispositivos invasivos, ou seja, o instrumento entra em contato direto com o meio. Esta situação é indesejável em caso de meios abrasivos ou corrosivos, pois gera a necessidade de uma recalibração periódica do equipamento ou mesmo sua substituição. Esta situação é característica do processo de transporte de minérios por um mineroduto, pois os sólidos transportados tendem a ser distribuídos de uma forma não homogênea com um perfil de velocidade não uniforme. Além disso, a taxa de fluxo de massa varia com o tempo devido à perda de carga que ocorre por atrito das pelotas com a parede do duto, por esse motivo optou-se por empregar radiação gama como forma de medida no projeto do dispositivo, pois é uma técnica não invasiva.

2 - REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 - Características da polpa

Para o dimensionamento e operação de um mineroduto é importante ter conhecimento sobre as principais características da polpa que irá percorrer o trajeto. A seguir serão explicados brevemente esses conceitos.

2.1.1 - Cálculo da Concentração Média e Densidade dos Sólidos na Mistura

Normalmente são utilizados dois parâmetros para caracterizar a concentração da polpa, sua massa e volume total transferido. Cada uma das fases (sólida ou líquida) mantém suas características e a mistura resultante possuem características novas dependentes das propriedades iniciais. Para cada uma das fases temos:

$$P_M = P_S + P_L \tag{2.1}$$

$$V_M = V_S + V_L \tag{2.2}$$

Onde:

P_M - Peso total da polpa;
P_S - Peso total fração sólida;
P_L - Peso da fração líquida;
V_M - Volume total da polpa;
V_S - Volume da fração sólida;
V_L - Volume da fração líquida.

A concentração média de sólidos (em volume) da mistura será calculada por:

$$C_m = \frac{M_S}{M_T} \tag{2.3}$$

$$C_V = \frac{V_S}{V_T} \tag{2.4}$$

Onde:

C_m - Concentração em massa de sólidos;
M_s - Massa total da fração sólida;

M_T - Massa da polpa;

C_v - Concentração volumétrica de sólidos;

V_S - Volume total da fração sólida;

V_T - Volume total da polpa.

Para a densidade da polpa temos:

$$\rho_{polpa} = \frac{SG}{\frac{C_m}{100} + SG\left(1-\frac{C_m}{100}\right)} \qquad (2.5)$$

Onde:

SG - Specific gravity (peso específico da fase sólida).

2.1.2 - Massa Transportada x Vazão de Polpa

A relação entre a vazão de polpa e a tonelagem transportada de minério é de grande utilidade para o setor industrial e é calculada por:

$$Q = T_h \left[\left(\frac{100}{C_m}-1\right) + \frac{1}{SG}\right] \qquad (2.6)$$

Onde:

Q - Vazão (expressa em $m^3 . h^{-1}$);

T_h - Quantidade de material seco (expressos em ton . h^{-1}).

2.1.3 - Granulometria

As partículas que compõem os processos industriais têm geralmente formas irregulares cuja caracterização é difícil. De forma simplificada, a especificação de uma partícula necessita de pelo menos uma medida do seu tamanho e uma medida da sua forma. A maneira mais comum de medir o tamanho é passar uma amostra do material granulado através de uma série de peneiras, cujo tamanho das aberturas é disposto em ordem decrescente (operação denominada de tamização).

Assim, o material será separado em frações de tamanhos compreendidos entre duas peneiras consecutivas, como mostrado na Figura 2.1, e por pesagem pode-se obter um valor correspondente para o tamanho médio. Normalmente adota-se como tamanho representativo (diâmetro nominal da partícula) de cada fração, a média geométrica do tamanho das aberturas de peneiras extremas.

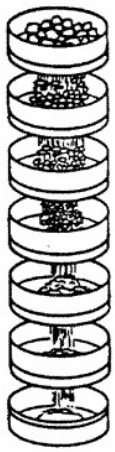


Figura 2.1 – Peneiras dispostas em série para medida do tamanho do minério. [17]

O tamanho das pelotas presentes em um mistura bifásica é um parâmetro importante, pois influencia principalmente no comportamento do fluxo. Quando as partículas são muito finas, a polpa costuma ter comportamento homogêneo. Por outro lado, quando as pelotas transportadas são de tamanho maior, tendem a ser transportadas próximas ao fundo da tubulação, pois nessa situação o peso exerce um papel importante, nesse caso o fluxo apresenta comportamento heterogêneo.

O minério proveniente da moagem pode apresentar uma distribuição granulométrica ampla ou estreita, dependendo da relação entre seus diâmetros característicos. Quando a distribuição de tamanho das pelotas apresenta partículas muito finas, a superfície específica (razão entre área superficial e volume) cresce e passam a prevalecer outros fenômenos além do peso das mesmas.

Uma distribuição de material com tamanho muito grande gera acúmulo de sólidos nas depressões da tubulação, podendo eventualmente ser removido através de ondas formando estruturas semelhantes a dunas, constituindo um risco para a operação de um mineroduto.

2.1.4 - Corrosão e Abrasão

A corrosão sofrida pela tubulação geralmente está aliada a esforços mecânicos e ocorre como resultado da erosão gerada pelo impacto das pelotas com as paredes do tubo, devido às ações dinâmicas do movimento destes corpos, como mostrado na Figura 2.2. Como via de regra, quanto maior é a velocidade do fluxo e o tamanho da partícula, maior será o desgaste por abrasão da tubulação.

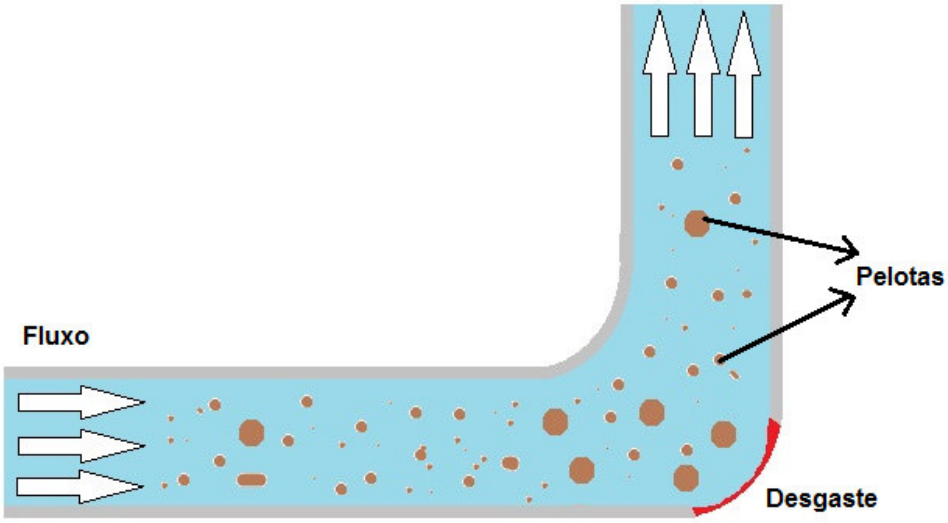


Figura 2.2 – Representação do desgaste por abrasão (em vermelho) gerado na tubulação por choques de pelotas de maior tamanho em suas paredes, podendo favorecer a corrosão na região indicada.

2.2 - Conceitos Hidrodinâmicos

Para a projeção e operação adequada de um mineroduto é de fundamental importância o conhecimento de conceitos básicos relativos à hidrodinâmica. Portanto na presente seção será dada uma breve descrição desses conceitos.

2.2.1 - Tipos de Fluxos

Os fluxos de polpa que atravessam o mineroduto podem ser classificados de acordo com a variação de suas propriedades no tempo e no espaço, conforme descrito abaixo:

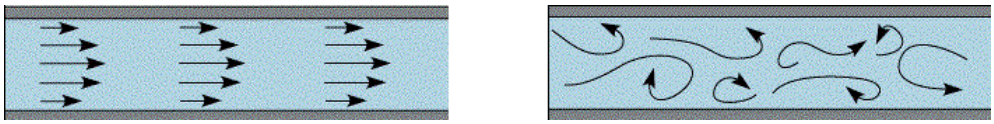
- **Permanente:** as propriedades do fluxo em uma determinada seção transversal

do duto não apresentam mudança no tempo;

- **Não permanente:** as propriedades do fluxo em uma determinada seção transversal do duto alteram à medida que transcorre o tempo;
- **Uniforme**: as propriedades do fluxo não apresentam mudança no espaço;
- **Não uniforme**: as propriedades do fluxo mudam de uma seção transversal do duto para outra.

Outra classificação a respeito do fluxo leva em consideração seu campo de velocidade:

- **Laminar:** se realiza por camadas paralelas, a baixas velocidades - Figura 2.3 (a);
- **Turbulento:** apresenta componentes de velocidade em todos os sentidos, ocorre a altas taxas de deslocamento - Figura 2.3 (b);
- **Transição**: corresponde à transição entre o fluxo laminar e o turbulento.



(a) (b)

Figura 2.3 - (a) Escoamento laminar; (b) Escoamento turbulento. [18]

2.2.2 - Velocidade Crítica e Velocidade Crítica de Sedimentação

Para dimensionar a instalação de um mineroduto, é fundamental o conhecimento das perdas de carga ao longo das tubulações. Sendo assim, é importante o conhecimento da velocidade mínima de operação para que não ocorra sedimentação dos sólidos, os quais poderiam obstruir os tubos, denominada velocidade crítica de sedimentação e da velocidade crítica que corresponde àquela que provoca a menor perda de carga.

Se a velocidade crítica for menor que a velocidade crítica de sedimentação, isto significará que a velocidade em questão é tal que acarretará na formação de um leito

de sedimentos, podendo levar ao bloqueio parcial ou até mesmo total da linha. Esta situação é mostrada na Figura 2.4.

Por outro lado, se a velocidade crítica for maior que a velocidade crítica de sedimentação, a condição de operação da unidade será mais adequada, pois além da mínima perda de carga é assegurado que não haverá formação de leito de sedimentos no fundo do duto. Contudo esta condição acarretará num consumo muito maior de energia pelas bombas aumentando o custo operacional do transporte.

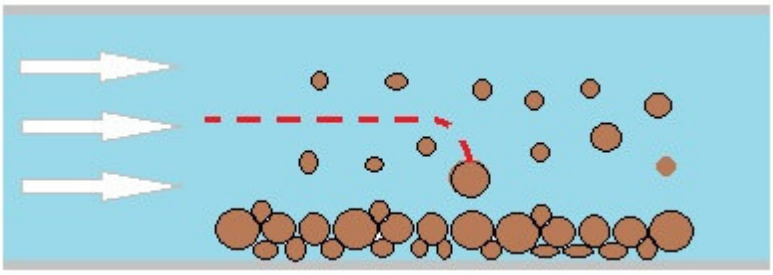


Figura 2.4 - Formação de leito estacionário em fluxo com velocidade inferior à velocidade crítica de sedimentação.

A velocidade crítica de sedimentação pode ser também considerada a velocidade necessária para os grãos que se encontram no topo do leito estacionário iniciarem o movimento.

Na prática industrial, essa velocidade limite corresponde ao menor valor da velocidade do fluxo de polpa em que não há risco de sedimentação dos sólidos e depende dos seguintes fatores:

- Granulometria do material sólido;
- Peso específico das pelotas;
- Diâmetro do tubo;
- Concentração de sólidos;
- Inclinação do tubo;
- pH da polpa.

Cabe ressaltar que existe uma velocidade limite superior, para o caso de bombeamento de misturas sólido-líquidas, sendo definida como a velocidade média que provoca desgaste abrasivo significativo da tubulação. Entretanto, este desgaste depende da dureza, tamanho, forma e densidade das pelotas. Esta velocidade pode resultar em mistura homogênea ou heterogênea em função do material sólido transportado. [19]

2.2.2.1 - Determinação da Velocidade Crítica de Sedimentação

O processo de determinação mais confiável é a determinação em laboratório, analisando primeiramente o instante em que se inicia a formação do leito de sedimentos. É altamente recomendado em projetos, utilizar a velocidade média do escoamento um pouco maior que a velocidade crítica, dada pela Equação 2.8:

$$V_{CS} = \frac{\sqrt[3]{(K.s.C.g.D.V_s)}}{1+C.(s-1)} \qquad (2.8)$$

Onde:

K - Constante;

s - Densidade relativa da pelota;

C - Concentração volumétrica;

g - Aceleração da gravidade;

D - Diâmetro do duto;

V_s - Velocidade de sedimentação da pelota.

Entretanto a velocidade de sedimentação é função também do diâmetro da partícula e da viscosidade do fluido, portanto estas propriedades devem estar incluídas em sua correlação conforme a Equação 2.9:

$$V_{CS} = F_L \sqrt{2.g.D.(s-1)} \qquad (2.9)$$

Onde:

F_L - É função da concentração volumétrica de sólidos e do tamanho da partícula.

Para valores de concentração volumétrica inferiores que 2% [19], o valor de F_L é dado por:

$$F_L = 2,853.d^{0,143} \tag{2.10}$$

Onde:

d – Diâmetro da pelota.

Para concentrações volumétricas inferiores a 2%, o valor de F_L pode ser obtido a partir do gráfico abaixo obtido por Durand [20] (considerando as pelotas como corpos uniformes):

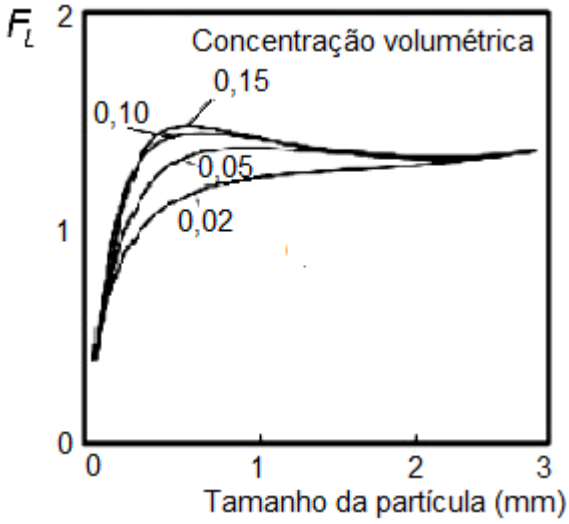


Figura 2.5 – Valor de F_L para diversas concentrações volumétricas, considerando sólido uniforme, obtido por Durand. [20]

Para pelotas que possuam valores de $85.d^{-1}$ inferiores a 0,002 [20], o valor máximo da velocidade crítica de sedimentação é dado pela Equação 2.11:

$$(V_{CS})_{máx} = 12,65 \cdot \left[\left(\frac{D}{d_{85}} \right)^{0,173} \cdot g \cdot d_{85} \cdot (s-1)^{0,8} \right]^{0,5} \tag{2.11}$$

Pela Figura 2.6 nota-se que existe um valor de velocidade crítica de sedimentação máximo para determinada concentração de sólidos:

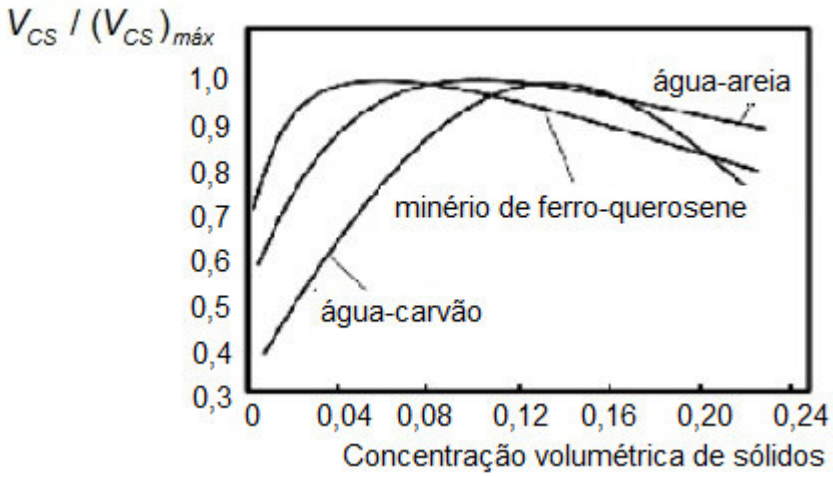


Figura 2.6 – Valores de $V_{CS}/(V_{CS})_{max}$ em função da concentração volumétrica, obtidos por experimentos de Sinclair. [20]

Por fim para a determinação precisa da velocidade crítica torna-se conveniente utilizar a correlação de perda de carga em seu cálculo.

2.2.3 - Perdas de Carga

As perdas de carga correspondem às perdas de energia devido à atuação de forças contrárias ao movimento, como por exemplo, o atrito do fluido com as paredes do tubo. Estas perdas podem se apresentar distribuídas ao longo de todo o mineroduto (perdas lineares) ou concentradas em um ponto (perdas singulares).

Para o tubo apresentado na Figura 2.7, temos a seguinte equação para o cálculo da perda de carga:

$$B_1 = B_2 + \Delta h_{12} \qquad (2.12)$$

Onde:

B1 - Energia no ponto 1;

B2 - Energia no ponto 2;

Δh_{12} - Perda de carga desde a seção (1) até a seção (2)

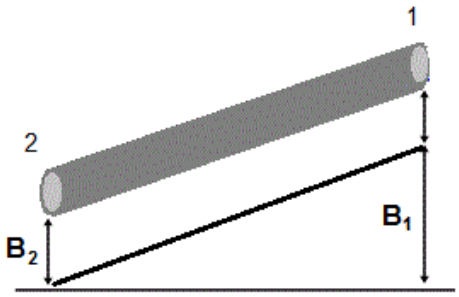


Figura 2.7 – Representação de um tubo para a exemplificação da perda de carga.

2.2.3.1 - Perdas de Carga Lineares

No caso de fluxo em tubulações, as perdas de cargas lineares podem ser calculadas a partir da Equação 2.13, mais conhecida por expressão de Darcy [20]:

$$J = \frac{\lambda \cdot V^2}{D \cdot 2 \cdot g} \qquad (2.13)$$

Onde:

J - Perda de carga;

λ - Coeficiente de atrito (em função do número de Reynolds e da rugosidade da tubulação);

V - Velocidade de escoamento;

D - Diâmetro do duto;

g - Aceleração da gravidade.

Para cálculos rotineiros em polpas minerais, é utilizado um valor para o coeficiente de atrito entre 0,015 e 0,020.

2.2.3.2 - Perdas de Carga Singulares

Toda variação brusca da forma ou da direção do duto dá origem a uma perda de carga adicional, denominada perda singular. Isso ocorre porque qualquer modificação em um tubo altera a uniformidade do fluxo. A origem de perdas singulares pode ser devido a: presença de válvulas, curvas, mudanças bruscas da área da seção transversal do duto e uniões entre trechos.

Para avaliar estas perdas geralmente é utilizado um coeficiente adimensional, K, característico para cada singularidade, de tal forma que a perda pode ser calculada por:

$$h_s = K.\frac{\overline{V}^2}{2.g} \qquad (2.14)$$

Onde:

h_s - Perda singular;

K - Coeficiente de perda (próprio de cada singularidade);

$\overline{V}$ - Velocidade média.

2.2.4 - Fenômenos de Transientes

Os fenômenos de transientes correspondem a uma instabilidade do fluxo em uma tubulação devido a mudanças bruscas da vazão e pressão, originadas, por exemplo, em uma parada do bombeamento. Por isso, para detectar um fenômeno de transiente, é necessário ter um controle contínuo da vazão e da pressão ao longo de toda a linha. [20]

2.2.5 - Regimes de Escoamentos

O escoamento de mistura heterogênea é o regime mais importante do transporte de sedimentos em um mineroduto, pois é geralmente o que transporta uma maior quantidade de pelotas por unidade de energia dissipada, ou seja, o deslocamento ocorre na velocidade crítica. Dessa forma, a velocidade crítica pode também ser entendida como a velocidade média do escoamento que provoca a dissipação mínima de energia para determinada fração de sólidos.

Dependendo do tamanho médio das pelotas, a velocidade crítica pode ser igual à velocidade limite entre o escoamento de misturas heterogêneas com leito estacionário e sem leito estacionário (velocidade crítica de sedimentação). Assim é possível perceber a importância do conhecimento da velocidade crítica, e consequentemente do escoamento heterogêneo para projetar um mineroduto, com prevenção de obstruções da linha. Esta relação é evidente na Figura 2.8, onde é mostrada a relação entre a perda de carga dentro do mineroduto e a velocidade média de escoamento.

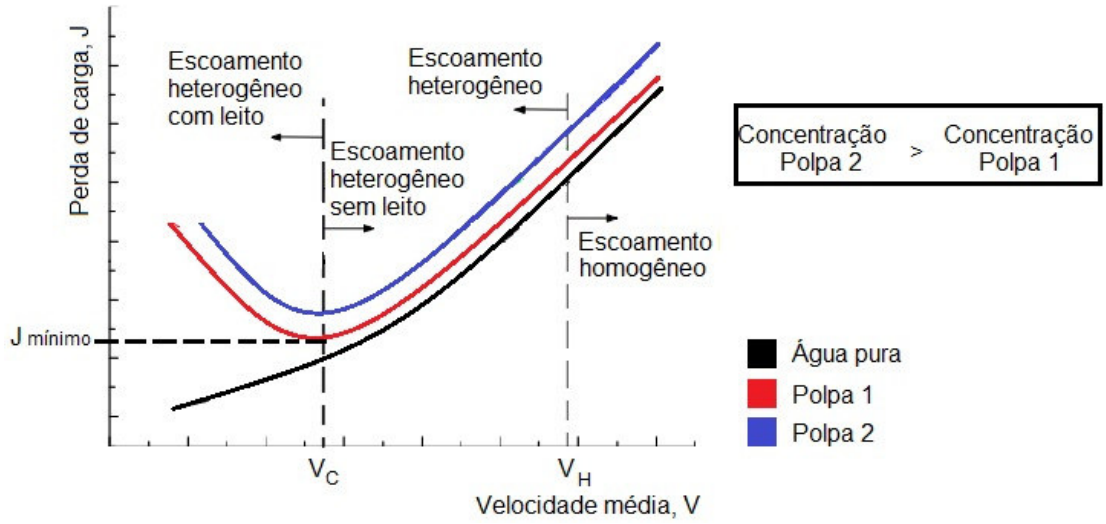


Figura 2.8 – Gráfico ilustrativo representando o formato da curva Perda de carga X Velocidade média, para água como solvente. [20]

Se a velocidade média do escoamento for superior à velocidade de transição, o regime de escoamento será homogêneo, caso contrário será heterogêneo, como indicado na Figura 2.8.

No escoamento heterogêneo sem leito estacionário, os sólidos não estão distribuídos uniformemente ao longo da direção vertical do tubo, portanto há um gradiente de concentração ao longo de sua seção transversal. Já no escoamento homogêneo, as pelotas estão distribuídas uniformemente no líquido ao longo da direção axial do tubo.

A distinção entre mistura homogênea e heterogênea em termos de projeto, não tem muita importância, pois o dimensionamento é calculado a partir da velocidade crítica (característica do escoamento heterogêneo). Todavia, o conhecimento desta velocidade de distinção é importante para não se cometer erros devido ao emprego inadequado das equações de resistência, já que cada regime de escoamento possui seu próprio conjunto de equações.

Matematicamente a distinção entre a mistura homogênea e heterogênea é determinada a partir do cálculo da velocidade de transição entre os dois escoamentos [19]:

$$V_H = \sqrt[3]{1{,}8 \cdot g \cdot V_{ss} \cdot D} \qquad (2.15)$$

Onde:

V_H - Velocidade de transição;

V_{SS} - Velocidade de sedimentação da pelota;

D - Diâmetro do duto;

g – Aceleração da gravidade.

3 - MINERODUTO

3.1 - A Construção de um Mineroduto

A construção do mineroduto só pode ser iniciada após a obtenção das licenças de implantação e operação, seguindo os passos listados abaixo e mostrados na Figura 3.1:

- **1ª etapa:** delimitação da área onde o mineroduto será instalado, geralmente possui 30 m de extensão;
- **2ª etapa**: transporte do tubo ao longo da rota do mineroduto;
- **3ª etapa:** abertura da vala para alocação do duto;
- **4ª etapa:** união das tubulações, que podem ser soldadas ou flangeadas;
- **5ª etapa:** colocação do tubo na vala;
- **6ª etapa:** cobertura do tubo na vala.

Durante estas etapas são adotados alguns procedimentos, como: ensaios não-destrutivos das soldas, testes hidrostáticos e teste de resistência do revestimento das juntas.

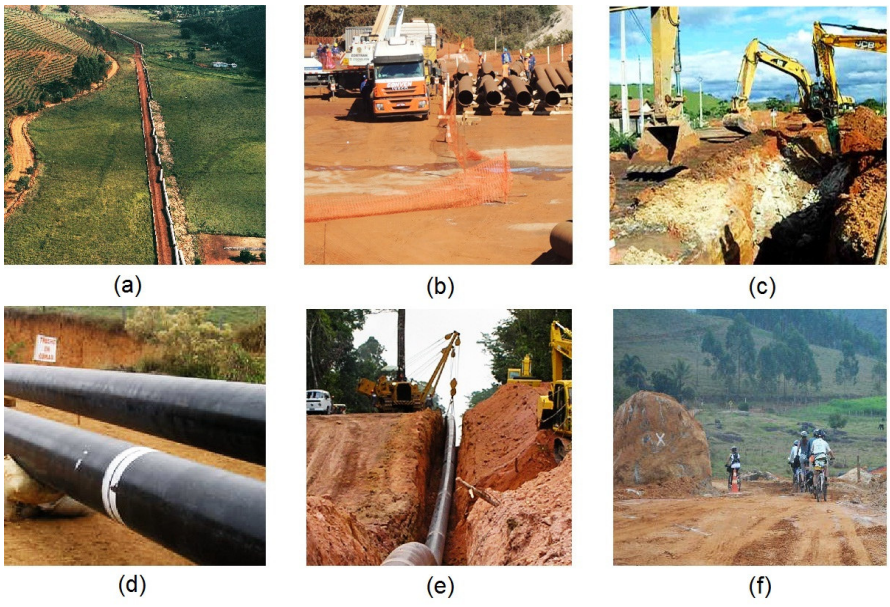


Figura 3.1 – Construção de um mineroduto: (a) Delimitação da área; (b) Transporte dos dutos; (c) Abertura da vala; (d) União das tubulações; (e) Colocação do mineroduto e (f) Cobertura do tubo. [21]

3.1.1 - Áreas de Influência

O impacto provocado pela implantação do mineroduto pode ser considerado de intensidade baixa e abrangência local, portanto a sua significância pode ser considerada desprezível. Entretanto caso ocorra, sua incidência é direta, permanente e reversível.

A intensificação de processos erosivos na fase de implantação, podem se tornar fontes de sedimentos e contribuir para o assoreamento de cursos d'água, mesmo que de maneira ínfima.

Na fase de operação do empreendimento não há previsão de impacto significativo para o meio biótico. Atividades de manutenção do mineroduto podem ser consideradas raras e pontuais, não causando impactos significativos.

3.1.1.1 - Área Diretamente Afetada

É considerada área diretamente afetada (ADA) a faixa de servidão do mineroduto. Durante o período de implantação são considerados como ADA os canteiros de obras, as estações de bombeamento e de válvulas, os acessos e os pátios temporários para armazenamento dos tubos do mineroduto, bem como a faixa de servidão.

São delimitadas as seguintes áreas num mineroduto:

- Área de Influência Direta: a área de influência direta (AID) para o meio físico e biótico, é considerada a mesma área delimitada como área diretamente afetada;
- Área de Entorno: como área de entorno é geralmente definida uma faixa de 500 metros para cada lado da faixa de servidão, onde se considera que os impactos diretos podem atuar (principalmente na fase de implantação do mineroduto);
- Área de Influência Indireta: a área de influência indireta é definida como as micro-bacias interceptadas pelo mineroduto.

3.1.2 - Análise da Implantação

Após a conclusão da construção do mineroduto, este está pronto para ser comissionado e entregue à operação.

Essa fase é iniciada com a revisão da estrutura mecânica da construção para garantir a qualidade, a segurança e eliminar falhas (em caso de existência). Após essa checagem, o mineroduto é iniciado apenas com água por um período determinado para avaliação de todo o processo. São verificados parâmetros mecânicos, elétricos e hidráulicos do duto, sendo os valores encontrados em campo comparados com os valores calculados no projeto.

3.2 - Sistema Operacional do Mineroduto

As estações de bombeamento devem operar sob a forma mais silenciosa possível de acordo com tecnologia moderna existente. Caso algum material sedimente durante a passagem pela tubulação, poderá haver desgaste do revestimento interno. Por essa razão o controle absoluto do tamanho do material deve ser rigoroso.

3.2.1 - Controle

Um sistema de controle e supervisão deve ser projetado para controlar e monitorar a polpa na tubulação, da mina até o terminal. O sistema deve incluir monitoramento de pressão no duto e detecção de vazamentos. O sistema deve ser operado e mantido pelo empreendedor, para que se reduza a dependência do fornecedor, uma vez que o sistema estiver instalado e funcionando corretamente.

Ao menos um operador deverá estar presente 24 horas por dia e 7 dias por semana, supervisionando as operações do mineroduto. O operador deve ter à sua disposição terminais de vídeo que fornecem informações e controle sobre a tubulação inteira, por essa razão nos locais onde estão instalados equipamentos de monitoramento não será necessária a presença de funcionários.

Figura 3.2 – Sala de controle de operação do mineroduto. [22]

No final da tubulação, é necessário um sistema de controle para monitorar e controlar o equipamento e a instrumentação no local. Um operador fornecerá, desde seu posto de trabalho, informações e dados de controle ao operador da estação. Os operadores devem ter acesso a gráficos e dados sobre toda a extensão do mineroduto, entretanto o controle deve ser limitado ao equipamento da estação local.

3.2.2 - Sistemas de Comunicação

A comunicação mantém a segurança do quadro de funcionários, dos equipamentos e do ambiente, portanto deve ser integrada a todas as estações, e seus sistemas deverão estar sempre operando corretamente.

3.2.3 - Monitoramento para Detecção de Vazamentos

O mineroduto deve ser monitorado por um sistema de detecção de vazamentos que inclui um programa de treinamento para o operador. Estes dados incluem medições de fluxo, pressão, densidade e temperatura nas estações de bombeamento, no terminal e/ou em diversos pontos ao longo do mineroduto.

O objetivo é detectar vazamentos, diagnosticar sua localização e enviar avisos aos operadores. No caso de identificação de um vazamento, a detecção deve acontecer em um intervalo entre 2 e 10 minutos após a ocorrência, em função do tamanho e localização do escape. Da mesma forma a identificação de uma obstrução é muito importante, pois reduz a possibilidade de um rompimento no mineroduto. A Figura 3.3 mostra o resultado de um vazamento acidental ocorrido em um mineroduto.

Figura 3.3 – Vazamento devido a uma fenda presente em um mineroduto, no rio São Sebastião (Minas Gerais). [23]

O princípio da detecção de vazamentos é a comparação dos níveis de fluxo, pressão e densidade da polpa ao longo da tubulação. Tradicionalmente um vazamento é reconhecido como um desvio das normas estabelecidas por esses parâmetros.

3.2.4 - Sistema Hidráulico

O perfil para a tubulação de concentrado de minério de ferro deverá ser desenvolvido para que o escoamento seja do tipo Newtoniano (regime permanente + fluxo laminar). O material utilizado na confecção da tubulação deverá levar em consideração a faixa de temperatura de trabalho e o pH da polpa.

3.2.5 - Operação do Mineroduto

O mineroduto deve ser projetado para uma operação contínua. Para garantir a segurança da operação do sistema, os procedimentos de fechamento e reatamento do sistema devem ser desenvolvidos durante o projeto.

3.2.6 - Manutenção do Mineroduto

Com a finalidade de preservar a vida útil das diferentes partes do equipamento, e assegurar que cada parte esteja operando com segurança e eficiência, é importante que:

- Sejam verificados parâmetros operacionais periodicamente;
- Os requisitos de manutenção dos fabricantes dos equipamentos sejam seguidos e, no caso da existência de conflitos, os requisitos mais estritos devem ser considerados;
- Geralmente é recomendada uma inspeção mensal da tubulação, e se houverem áreas críticas mais sensíveis a danos, as inspeções deverão ser mais frequentes;
- Em áreas sujeitas à erosão severa, a inspeção ocorrerá com periodicidade menor e obrigatoriamente após cada evento climático (chuvas) nas áreas afetadas.

Figura 3.4 – Inspeção de um trecho do mineroduto onde ocorreu erosão do terreno. [24]

A regra básica para a troca de peças é providenciar a substituição do componente original com um mínimo de tempo de paralisação e ao mesmo tempo ter um número suficiente de peças disponíveis para reparar o equipamento defeituoso.

Cabe lembrar que um programa de manutenção com planejamento além da rotina resultará num melhor desempenho, permitindo a operação do mineroduto com máxima eficiência, pois reparos ou trocas de emergência têm um impacto significativo na disponibilidade da tubulação e consequentemente na produção.

3.3 - Impactos Negativos Gerados pela Implantação e Reparo do Mineroduto

Como dito, os impactos gerados devido à implantação do mineroduto são pequenos ou inexistentes, pois a tubulação na sua maior parte encontra-se totalmente enterrada, demonstrando que as atividades de manutenção do mineroduto ocorrerão de forma esparsa. Porém, ocasionalmente podem ser liberados efluentes aquosos de polpa de minério decorrentes de atividades de reparo para substituição de trechos do duto. Este fato pode alterar a qualidade das águas superficiais da região onde está localizada a tubulação do mineroduto.

É muito importante a adoção de medidas de controle e mitigação tais como: o controle do descarte de purgas de polpa de minério e destinação de água com minério para reservatórios adequados, conforme as diretrizes constantes do Plano de Gestão de Resíduos e do Plano de Gestão de Recursos Hídricos. Isto contribuirá para a

mitigação dos impactos ambientais. [25]

3.4 - Principais Minerodutos Brasileiros

No Brasil, a rede de minerodutos já implantada e em operação ainda é relativamente pequena. Mas, há alguns anos, o interesse pela utilização desse modal para o transporte de bens minerais tem crescido acentuadamente e atraído investimentos privados, principalmente para suprir as deficiências operacionais, de capacidade e segurança das ferrovias e rodovias brasileiras.

O investimento por quilômetro de dutovia depende do tipo de produto que se quer transportar, da topografia que encontra o trajeto do duto e do seu diâmetro. Tais empreendimentos englobam a construção de mineroduto e terminal portuário próprios, com a finalidade de reduzir os custos de frete. [26]

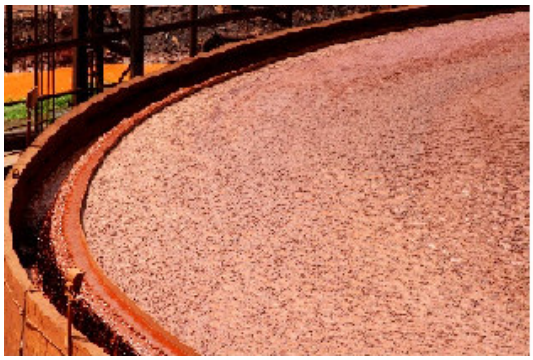
Na área de minerodutos brasileiros, podemos destacar: a SAMARCO (transporte de minério de ferro, Minas Gerais – Espírito Santo), a Fosfértil (transporte de concentrado fosfático, Minas Gerais) e Anglo Ferrous Brazil (transporte de minério de ferro, Minas Gerais – Rio de Janeiro). [27]

3.4.1 - SAMARCO

Com sua mina e usina de beneficiamento na cidade de Mariana (Minas Gerais), a SAMARCO Mineração S.A., possui atualmente duas linhas de mineroduto em operação, com terminais nas cidades de Mariana e Ponta do Ubu (Espírito Santo).

- **Linha 1:** Em operação desde 1978, com 396 km de extensão; A duração do transporte do minério de ferro no mineroduto é de aproximadamente 63 horas, a uma velocidade média de 1,8 $m.s^{-1}$. Por ano, o volume de minério transportado é de aproximadamente 16,5 milhões toneladas/ano;
- **Linha 2:** Entrou em operação em maio de 2008, e tem 400 km de extensão e capacidade de transporte de 7 milhões toneladas/ano.

O bombeamento da polpa de concentrado é realizado com uma porcentagem de sólidos na faixa de 70%.



(a)

(b)

Figura 3.5 – (a) Preparação da polpa para ser impulsionada no interior do mineroduto e (b) trecho de um mineroduto, ambos da SAMARCO Mineração S.A. [28]

O mineroduto constituiu uma vantagem para a SAMARCO no que se refere a custo de transporte, pois segundo estudos, a empresa possui um custo de transporte da mina ao porto de US$2,00/t, enquanto ao utilizar o transporte ferroviário, esse custo gira em torno de US$7,00/t. Recentemente a empresa foi incorporada ao grupo Companhia Vale do Rio Doce (CVRD). [27]

3.4.2 - Fosfértil

Atende aos municípios de Tapira e Uberaba, ambos localizados em Minas Gerais (MG). Iniciou a operação em 1979, sendo o complexo de mineração da Fosfértil o maior da América Latina, movimentando em torno de 28 milhões de toneladas/ano de minério através de 120 km de extensão de dutos. [27]

Figura 3.6 – Complexo industrial da Fosfértil em Minas Gerais. [29]

3.4.3 - Anglo Ferrous Brazil

A empresa possui um mineroduto de 524 km que cruza 32 municípios da região Sudeste e liga o município de Conceição do Mato Dentro (Minas Gerais) ao Porto do Açu, na cidade de São João da Barra (Rio de Janeiro). A “viagem” da polpa demora cerca de 3 dias para percorrer esse trajeto.

Figura 3.7 – (a) Trecho do mineroduto e (b) seu terminal em Porto de Açu, Rio de Janeiro. Ambas as imagens são do mineroduto da Anglo Ferrous Brazil. [30]

A adoção do transporte dutoviário pela empresa acarretou em uma drástica economia com o transporte do minério de ferro, que representava 75% do preço final do produto. Esse alto valor é decorrente do principal destino do minério de ferro produzido pela Anglo Ferrous Brazil ser a indústria siderúrgica chinesa. A redução no custo do transporte possibilitou que a empresa apresentasse uma margem de lucro maior. [26]

4 - FUNDAMENTOS TEÓRICOS

4.1 - Radiações Eletromagnéticas

Radiação pode ser definida como um processo físico de emissão ou propagação (transferência) de energia, seja por intermédio de fenômenos ondulatórios, seja por meio de partículas dotadas de energia cinética. Também pode ser definida como uma forma de energia que se propaga de um ponto a outro no espaço, através de um meio material sob a forma de ondas eletromagnéticas, as quais são constituídas de um campo elétrico e um campo magnético perpendiculares entre si, que variam harmonicamente, sendo ambos perpendiculares à direção de propagação da onda.

As ondas eletromagnéticas podem se propagar tanto em meio material como no vácuo, sendo o espectro das ondas eletromagnéticas contínuo, ou seja, existem ondas eletromagnéticas de todos os comprimentos de onda. Contudo, torna-se conveniente dividir o espectro em faixas com limites precisos e, atribuir a cada um desses intervalos um nome específico, conforme ilustrado na Figura 4.1.

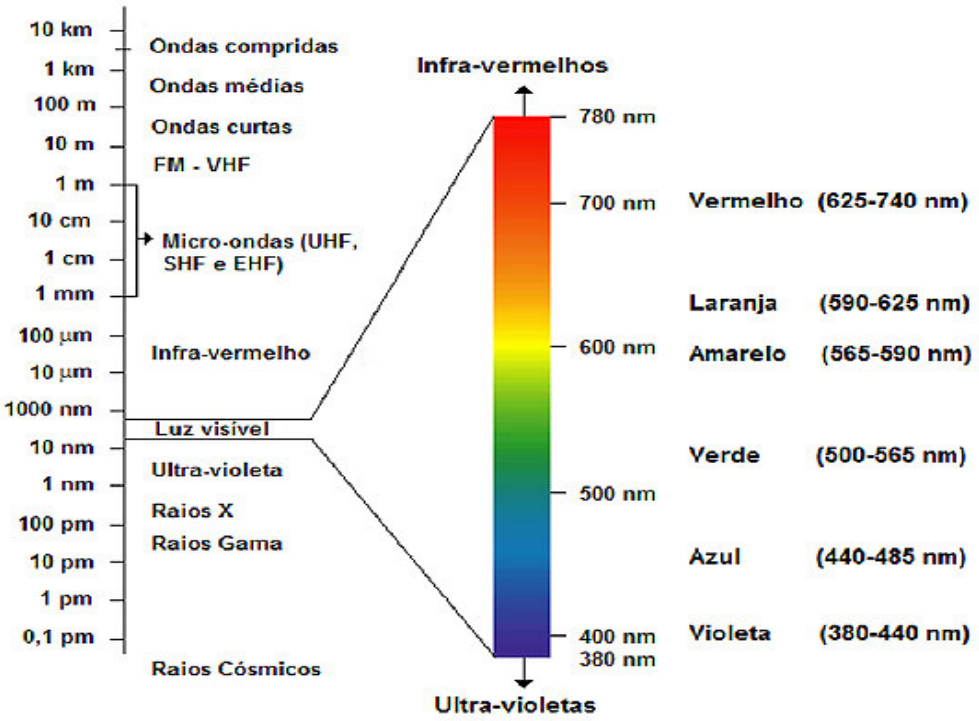


Figura 4.1 - Espectro de ondas eletromagnéticas mostrando em evidência o espectro da luz visível. [31]

O efeito causado pela radiação eletromagnética na matéria é resultado da transferência de energia desta radiação para o material. Considerando a quantidade de energia e o processo pelo qual a onda interage com a matéria, a radiação pode ser descrita como não-ionizante ou ionizante: [32]

- **Radiação não-ionizante**: possui relativamente baixa energia e, como o próprio nome especifica, não produz ionização ao interagir com o meio. As fontes de radiação não-ionizante subdividem-se em dois tipos: emissoras intencionais e não intencionais. As fontes emissoras intencionais são representadas principalmente por antenas de recepção e transmissão de: rádio, televisão, radares e serviços de comunicações móveis. Geralmente situam-se próximas a residências submetendo estas às doses de radiação diária. Já as fontes não intencionais incluem os equipamentos elétricos e eletrônicos de uso comercial e industrial, que podem de alguma maneira emitir algum tipo de onda eletromagnética, no entanto apenas uma parcela relativamente pequena da população está exposta de forma significativa a esta radiação. [33], [34].

- **Radiação ionizante:** apresenta altos níveis de energia, é originada a partir do núcleo de átomos ou da eletrosfera (no caso dos raios X), podendo provocar alterações do estado físico de uma molécula/átomo e ocasionar perda de elétrons, gerando cátions (átomos positivamente carregados). Este processo chama-se "ionização". A interação da radiação ionizante com a matéria se dá através principalmente da interação Columbiana direta entre as partículas carregadas eletricamente (elétrons, prótons, etc.) e os elétrons localizados nos orbitais dos átomos alvo. As radiações ionizantes são classificadas em três grupos:

1. **Radiação eletromagnética com energia de fóton acima de 12 eV:**
    - Raios X: originados de desexcitações atômicas (raios X característicos) e da desaceleração de partículas carregadas (Bremsstrahlung);
    - Raios gama: originados de desexcitações nucleares;
    - Fótons de aniquilação: originados da aniquilação de pares partícula-antipartícula.

2. **Partículas Carregadas Rápidas:** partículas eletricamente carregadas com energia cinética superior às energias de ligação de elétrons atômicos e podem ser, originadas por:

   - Emissão por núcleos atômicos: partículas alfa e beta e produtos de fissão nuclear;
   - Emissão por átomos: elétrons Auger;
   - Feixes produzidos em aceleradores de partículas: elétrons, pósitrons, prótons, dêuterons, íons de qualquer número atômico ou número de massa;
   - Radiação cósmica primária ou produtos de sua interação com a atmosfera: múons, píons, etc.;
   - Produtos de reações nucleares**.**

3. **Nêutrons livres com qualquer energia cinética e de qualquer origem.** [35]

4.2 - Interação da Radiação Ionizante com a Matéria

A maneira com que cada material reage é dependente do tipo de radiação e também da energia da onda eletromagnética incidente, ou seja, dependendo da natureza da radiação e da energia do feixe incidente. Interações específicas podem ocorrer nos materiais dependendo das características do feixe incidente: fótons gama interagem pela ação de campos eletromagnéticos, atuando sobre partículas carregadas do meio; partículas carregadas têm sua ação em elétrons do meio aproximadas por interações Coulombianas consecutivas; nêutrons atuam sobre prótons e núcleos atômicos pela ação da força nuclear forte.

O conhecimento dos conceitos básicos dos processos da interação da radiação gama com a matéria é de fundamental importância para entender a forma como opera um detector de radiação, bem como para que seja efetuada corretamente uma medida experimental.

Apesar de vários processos estarem envolvidos na cadeia que produzem o pulso elétrico na saída do sistema de contagem, o registro pelo detector das características de uma determinada amostra depende de como os fótons da radiação

incidente interagem com o material do detector.

Fótons gama, ao atravessarem a matéria, podem depositar energia em um processo que consiste de duas etapas: primeiro, a transferência direta de energia para uma partícula carregada (elétron ou pósitron) e em seguida, deposição dessa energia no meio.

A maneira com que um fóton gama “traça” o seu “caminho” através de um material é um processo probabilístico, sendo assim não há como prever com precisão o quão longe ele vai chegar antes de se “envolver” em uma interação, como também, não é possível prever com exatidão o tipo de interação que irá ocorrer dentro do material do detector.

Existe uma dependência entre a energia do fóton incidente, o número atômico e a densidade do meio na probabilidade do fóton realizar um dos processos possíveis de interação. Esta probabilidade é normalmente expressa como uma grandeza chamada secção de choque e representa a probabilidade de uma reação ocorrer. Quando um fóton gama penetra a matéria podem ocorrer três processos básicos (Figura 4.2):

- **Transmissão do fóton:** não ocorre interação;
- **Absorção total do fóton:** há transferência total de sua energia para partículas carregadas leves, como elétrons e pósitrons;
- **Espalhamento do fóton resultante:** podendo ter ou não a mesma energia do fóton incidente, porém percorre uma direção diferente da direção de incidência.

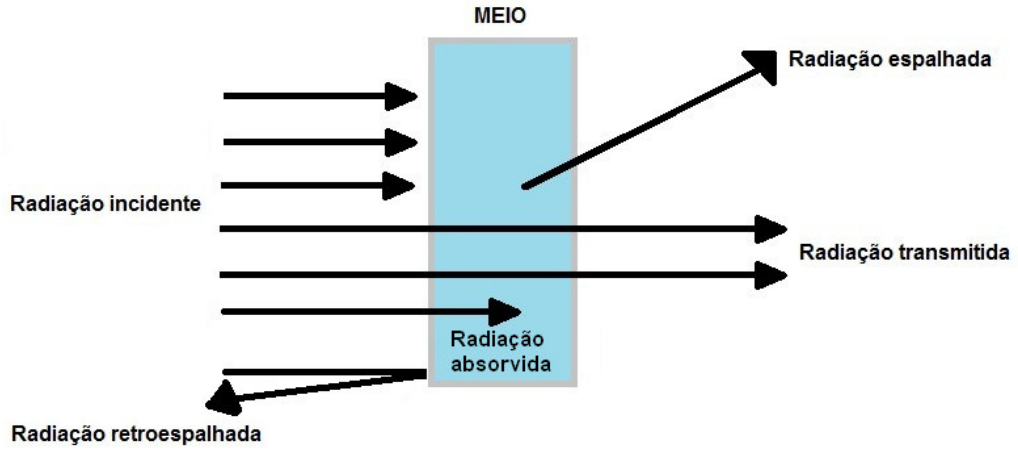


Figura 4.2 – Esquema indicando os tipos possíveis de interação da radiação com a matéria.

4.2.1 - Interações de Fótons com a Matéria

Considerando os detectores cintiladores NaI (iodeto de sódio) e a radiação gama, existem três processos, todos ocorrendo simultaneamente no interior do cristal cintilador, e com probabilidades distintas. São eles:

- **Espalhamento Coerente ou Efeito Rayleigh:** corresponde à absorção e reemissão da radiação pelo átomo em uma direção que pode não coincidir com a de incidência conforme ilustrado na Figura 4.3. Neste caso não ocorre deposição alguma de energia dentro da região sensível do detector. Somente neste processo a radiação é considerada onda; em todos demais a radiação é considerada constituída de fótons.

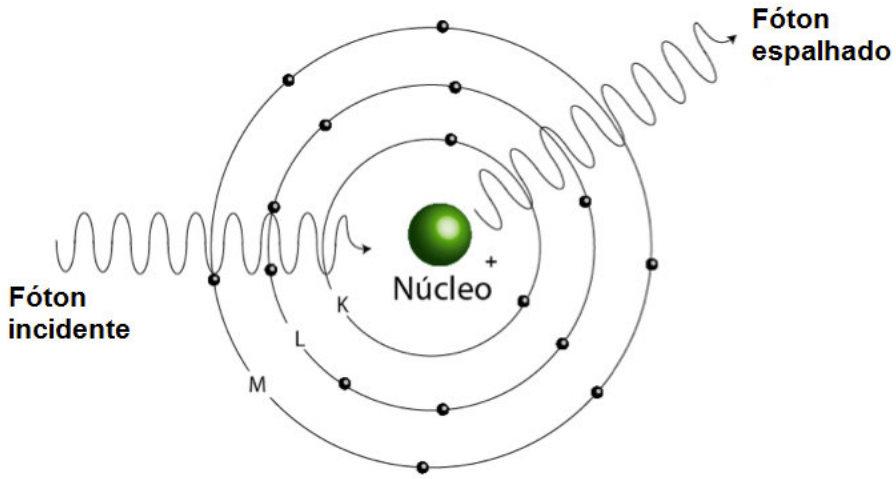


Figura 4.3 - Espalhamento coerente: absorção e reemissão da radiação pelo átomo. [36]

- **Efeito fotoelétrico**: o fóton é absorvido pelo átomo e um elétron é liberado para se mover no material. Neste processo toda a energia do fóton gama incidente é absorvida por um elétron do cristal do detector, o qual é "arrancado" da camada eletrônica do átomo. A energia gama é transformada em energia cinética, sendo a energia do elétron igual à diferença entre a energia do fóton incidente e a energia de ligação do elétron na camada eletrônica. O núcleo do átomo também absorve uma pequena quantidade de energia (energia de recuo), mas é desprezível comparada com a energia do elétron. Como resultado o átomo fica com uma vacância na camada eletrônica na qual o elétron foi ejetado, resultando na emissão de fótons característicos. O

resultado é que estes fótons gerados podem ser absorvidos por um segundo efeito fotoelétrico, sendo então, neste caso, a energia do fóton incidente totalmente absorvida pelo cristal do detector. Uma característica importante do efeito fotoelétrico num detector de cintilação é que fótons monoenergéticos produzirão uma distribuição monoenergética dentro do volume do detector, denominada fotopico no espectro de energia da fonte. Esse processo encontra-se esquematizado na Figura 4.4.

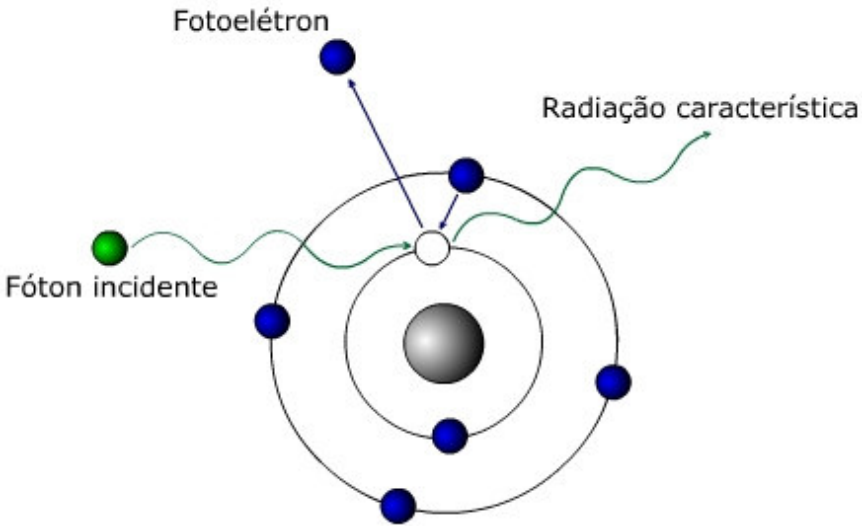


Figura 4.4 - Efeito fotoelétrico: emissão de fotoelétron e radiação característica. [37]

- **Efeito Compton ou espalhamento inelástico:** espalhamento de um fóton por um elétron livre do material. Nesta interação existe a transferência de parte da energia e do momentum do fóton incidente para o elétron livre, e a energia restante é emitida em forma de outro fóton com direção diferente do fóton inicial (Figura 4.5). Para espalhamentos com fótons gama de baixa energia, o átomo permanece praticamente no seu estado inicial, sendo considerada nula a perda de energia do gama incidente, ocorrendo somente uma mudança na direção de propagação. À medida que a energia aumenta, o efeito do espalhamento Compton é mais evidente. Os valores das energias do fóton espalhado e do elétron são dados respectivamente pelas Equações 4.1 e 4.2:

$$E_{\gamma}^{1} = \frac{E_{\gamma}^{0}}{1 + \frac{E_{\gamma}^{0}}{m_0 c^2}(1 - \cos\theta)} \qquad (4.1)$$

$$E_e = E_\gamma^0 - E_\gamma^1 \qquad (4.2)$$

Onde:

E_γ^0 - Energia do fóton gama incidente;
E_γ^1 - Energia do fóton gama espalhado;
E_e - Energia do elétrom livre espalhado;
m_0c^2 - Massa de repouso do elétron;
θ - Ângulo de espalhamento.

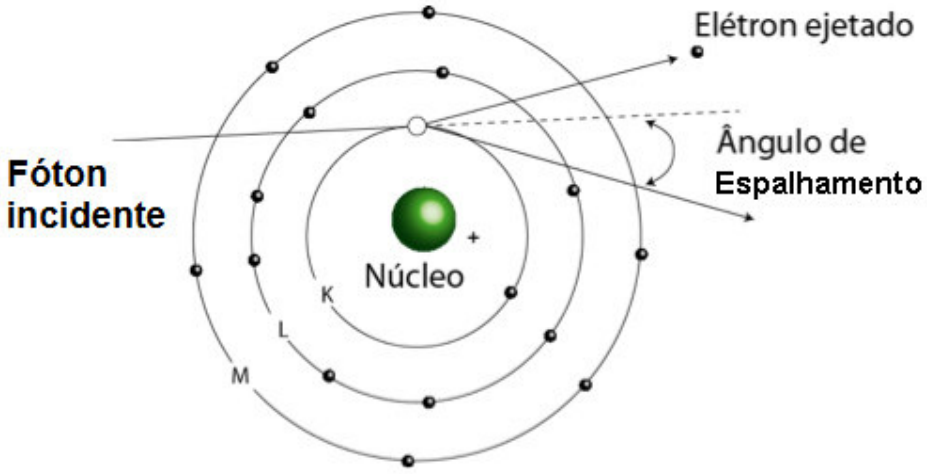


Figura 4.5 - Efeito Compton: espalhamento de um fóton por um elétron livre. [38]

As relações mostram que a energia do fóton espalhado pode variar de um valor nulo (θ=0º) até um valor máximo (θ=180º), ou seja, uma fonte monoenergética de radiação gama produz uma distribuição de energia contínua, como resultado das várias possibilidades de interação pelo espalhamento Compton. Esta situação gera no espectro da fonte uma estrutura denominada de "Joelho Compton".

- **Produção de pares:** o fóton é absorvido e toda sua energia é convertida em massa de repouso e energia cinética de um par partícula-antipartícula (elétron + pósitron). Se a energia do fóton incidente exceder a massa de repouso do par pósitron-elétron (1.02 MeV), a produção de pares torna-se possível. Neste processo, o fóton gama incidente desaparece e um par pósitron-elétron é gerado. A energia total do par de partículas é igual à energia total do fóton

incidente (energia cinética + energia gama) menos a massa de repouso do par. Uma vez que o pósitron possui um tempo de vida muito curto, o processo de aniquilação ocorre no interior do detector gerando dois fótons gama de 511 keV colineares em direções opostas, conforme ilustrado na Figura 4.6.

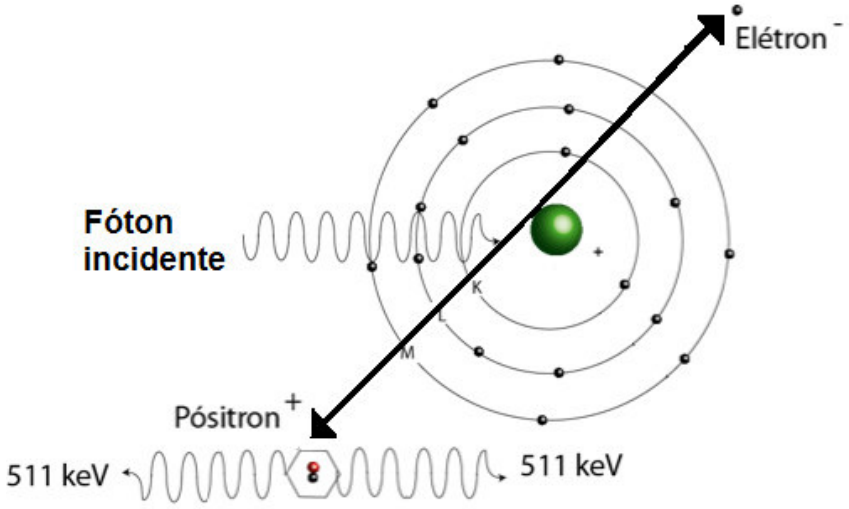


Figura 4.6 - Produção de pares, evidenciando também a aniquilação dos pares. [39]

Sob o ponto de vista de probabilidades de ocorrência, a ordem de prevalência de cada efeito é função dependente da energia de fóton incidente. É possível dizer que os efeitos de espalhamento coerente e efeito fotoelétrico ocorrem com maior probabilidade para baixas energias, enquanto o efeito Compton tem maior probabilidade de ocorrer para energias intermediárias. Enquanto que a produção/aniquilação de pares só acontece acima de um limiar de energia, sendo necessário que o fóton tenha no mínimo 1,022 MeV de energia (equivalente a duas massas de repouso de elétron) para que toda sua energia se converta em massa de repouso e energia cinética do par (e^-/e^+). A probabilidade total de detecção de um fóton gama é expressa pelo coeficiente de absorção total, dado pela Equação 4.3:

$$\mu_T = \mu_F + \mu_C + \mu_P \qquad (4.3)$$

Onde:

μ_T - Coeficiente de absorção total;
μ_F - Coeficiente de absorção para o efeito fotoelétrico;
μ_C - Coeficiente de absorção por efeito Compton;
μ_P - Coeficiente de absorção para a produção de pares.

A Figura 4.7 mostra a distribuição de probabilidades destes efeitos para diferentes materiais em função da energia de radiação incidente:

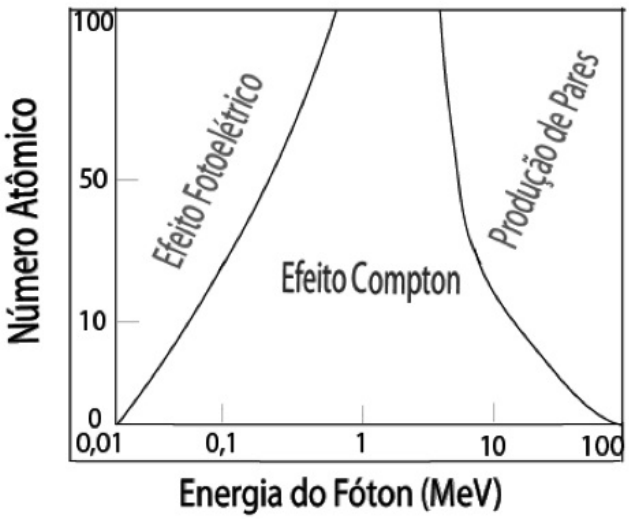


Figura 4.7 – Gráfico que apresenta a região de predominância do tipo de interação da radiação incidente em relação aos valores de número atômico e de energia incidente. [40]

Assim, os fótons ao passarem através da matéria podem envolver-se em interações fotoelétricas ou de espalhamento Compton com os elétrons do material. A combinação desses três tipos de interações produz a atenuação total do feixe incidente.

4.3 - Atenuação de Radiação Gama

A radiação gama pode não ser completamente absorvida, mas reduzida em intensidade ao passar através da matéria (fenômeno chamado blindagem). Considerando um feixe de radiação gama monoenergético estreito (“pencil beam”) e garantindo as condições de blindagem e colimação adequadas, como ilustrado na Figura 4.8, a Lei de Atenuação de um feixe de fótons relaciona o número de fótons incidentes perpendicularmente a um material homogêneo (I_0) e o número de fótons que emerge desse meio sem interagir com ele (I).

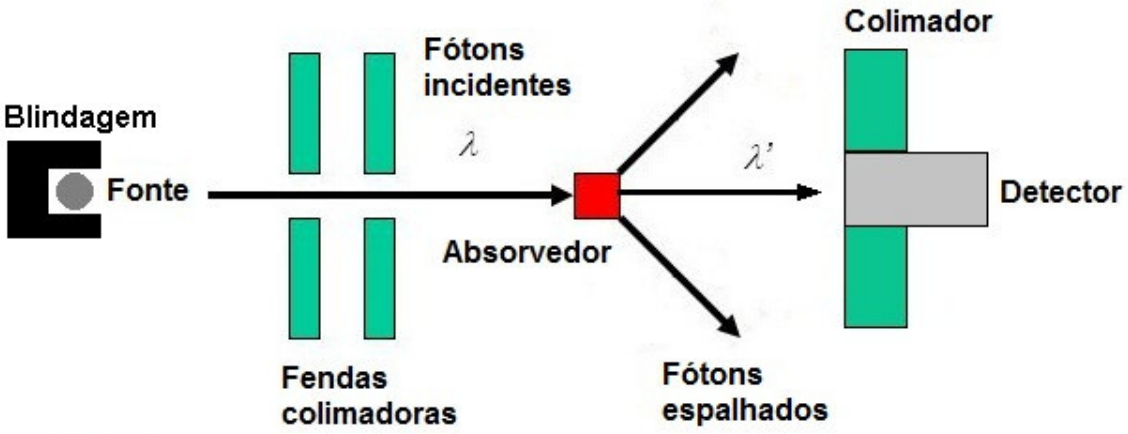


Figura 4.8 - Espalhamento do feixe de radiação gama por um absorvedor. [41]

Dessa forma a medida da atenuação do feixe é dada pela Equação 4.4:

$$I = I_0 \cdot e^{-\mu \cdot d} \qquad (4.4)$$

Onde:

I - Intensidade do feixe de radiação gama transmitido através do absorvedor;
I_0 - Intensidade do feixe de radiação gama incidente no absorvedor;
μ - Coeficiente de atenuação do material absorvedor;
d - Espessura do absorvedor.

Uma vez que o produto μ.d da Equação 4.4 deve ser adimensional, e considerando que a espessura do absorvedor é medida em cm, então o coeficiente de atenuação tem dimensão [cm^{-1}] e é chamado coeficiente de atenuação linear, μ_l.

Se a espessura d pode ser expressa em [g.cm], o coeficiente de atenuação é chamado coeficiente de atenuação de massa, μm, e tem unidades de [$cm^2.g^{-1}$].

A relação entre os coeficientes é dada pela Equação 4.5: [42]

$$\mu_l \left[cm^{-1}\right] = \mu_m \left[cm^2.g^{-1}\right] \cdot \rho \left[g.cm^{-3}\right] \qquad (4.5)$$

4.4 - Detectores Cintiladores

Quando a radiação ionizante passa através da matéria pode excitar os átomos e moléculas nesse meio. Os materiais em que o tempo de vida do estado excitado é

inferior a 10^{-9} s e o processo de relaxamento para o estado fundamental ocorre via emissão de um fóton de luz visível (com energia mais baixa que a energia de absorção pelo meio) são denominados cintiladores (ou fosforescentes).

A quantidade de luz produzida em um cintilador é muito pequena, necessitando ser amplificada de modo a permitir que a intensidade da radiação incidente no material possa ser registrada como um pulso elétrico. Esta amplificação de sinal ou multiplicação da intensidade da luz é obtida por um dispositivo chamado fotomultiplicador, sendo projetado e construído de forma a aceitar a pequena quantidade de luz gerada no material cintilador, amplificar várias vezes a intensidade deste pulso de energia e gerar um pulso de sinal intenso na sua saída. Estas amplificações são da ordem de 10^6 em dispositivos convencionais.

A geração de um sinal com um detector cintilador é dividida em duas etapas:

- **1ª etapa:** absorção da energia da radiação incidente e produção de fótons de luz visível;
- **2ª etapa:** amplificação do sinal luminoso no tubo fotomultiplicador e geração de um pulso elétrico na sua saída.

As radiações ionizantes, tal como partículas alfa e beta, excitam o material do cintilador diretamente, enquanto a radiação gama gera elétrons através do efeito fotoelétrico, efeito do espalhamento Compton ou da produção de pares. Estes elétrons é que promoverão o fenômeno da cintilação.

Os parâmetros mais importantes de um detector cintilador são: densidade do material cintilador; número atômico médio; tamanho do cristal; pureza; índice de refração; máximo da emissão de fluorescência; qualidade da transmissão óptica; rendimento na produção de luz; linearidade entre a energia da partícula incidente e intensidade de cintilação e a sua resolução.

Em um sistema de medição real, o cintilador está acoplado diretamente ou por meio de um dispositivo especial (guia de acoplamento óptico) no tubo fotomultiplicador. O índice máximo de emissão e de refração do material cintilador são parâmetros importantes na decisão da forma de acoplamento óptico e do tipo do tubo fotomultiplicador: o máximo de emissão do cintilador deve estar perto do máximo de absorção do fotocatodo do tubo fotomultiplicador.

As principais características de um meio cintilador para que possa ser empregado como detector de radiação nuclear é:

- Alta probabilidade de transformação de uma radiação incidente em um ou mais elétrons rápidos;
- A energia cinética das partículas carregadas no material luminescente deve ser convertida de forma tão eficiente quanto possível em energia de excitação e ionização dos átomos do cintilador;
- A desexcitação dos átomos deve resultar em emissão de radiação fluorescente (luz de cintilação) e esta radiação deve ser transmitida tão livremente quanto possível através do material luminescente;
- A radiação deve ser de tal comprimento de onda que corresponda com a característica da curva espectral do fotomultiplicador;
- A fotossensibilidade do catodo do tubo deve ser elevada, de modo que a emissão máxima de fotoelétrons seja garantida;
- A quantidade de radiação luminosa emitida (e a fração que atingir o catodo) deve ser proporcional à energia da radiação incidente;
- Número de fotoelétrons liberados deve ser diretamente proporcional à energia da radiação incidente.

Os cintiladores mais empregados na área nuclear são os cristais inorgânicos, puros ou dopados com pequenas impurezas que auxiliam no processo de emissão da luz visível. Os cristais cintiladores exigem um processo complexo de produção para garantir a linearidade do processo de conversão da energia da radiação incidente em luz visível. Devem ser transparentes, sem apresentar danos ou rachaduras, com a finalidade de evitar que a radiação luminosa gerada seja refletida fora da área do fotomultiplicador.

Neste trabalho foram utilizados detectores NaI (cristais cilíndricos de 1 x 1 ") dopados com Ta. São dispositivos frágeis que devem ser preservados de choques mecânicos, variações bruscas de temperatura, sendo o NaI um cristal altamente higroscópico, os detectores devem ser mantidos em ambiente seco. Por esta razão, estes cristais são montados em um só conjunto com o sistema de acoplamento óptico e o tubo fotomultiplicador, como mostrado na Figura 4.9.

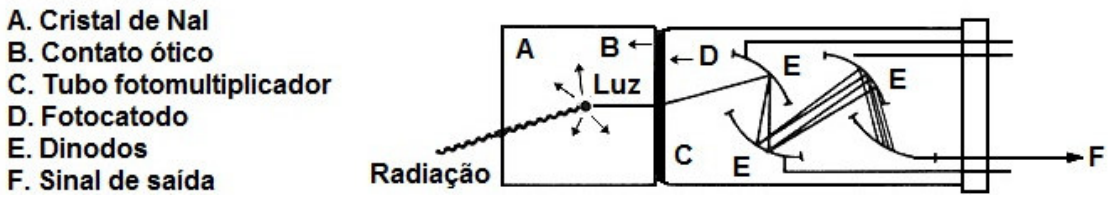


Figura 4.9 - Geração do pulso elétrico a partir da incidência de radiação gama em um cristal cintilador de NaI. [43]

A geração de um pulso de sinal empregando-se um detector cintilador é complexa, abrangendo desde a geração de luz no cristal cintilador até a formação de um pulso elétrico que possa ser identificado e contado pelo sistema de aquisição de dados. A partir do sinal de luz gerado pela incidência da radiação no cristal cintilador, o conjunto o transforma em um pulso de carga negativa. O sinal na saída do tubo fotomultiplicador é um sinal muito baixo e necessita de módulo de pré-amplificação para promover uma correta acoplação entre o detector e o resto do sistema de contagem, minimizando possíveis interferências de fontes de ruído ao amplificar o sinal. Esse sinal na saída do pré-amplificador é da ordem de alguns mV e não podem ser utilizados sem uma amplificação adequada que é realizada no amplificador. A finalidade desse último módulo é amplificar e modelar o formato do pulso elétrico, relacionando sua amplitude e duração com as características da radiação incidente.

É então gerada uma série de pulsos discretos com características definidas, que possam ser analisados pelo módulo analisador de altura de pulsos (mono-canal ou multicanal) e assim contados pelo módulo contador (Scaler ou Ratemeter). Todo o conjunto é mostrado na Figura 4.10. [44]

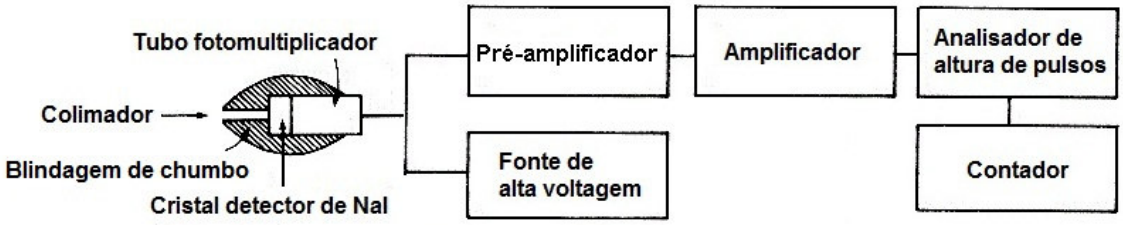


Figura 4.10 – Esquema de um conjunto típico de contagem de pulsos de uma fonte de radiação gama com um detector cintilador NaI. [45]

4.4.1 - Espectroscopia com Detectores Cintiladores

Cristais de iodeto de sódio são utilizados como detectores cintiladores devido à sua elevada densidade (3,67 g/cm^3) e ao alto número atômico do iodo, tornando alta a secção de choque para a interação dos raios gama com o cristal. Além disso, este material possui uma alta eficiência luminosa, sendo a luz gerada transmitida para o fotocatodo da válvula fotomultiplicadora diretamente, ou por reflexão, gerando emissão de fotoelétrons do fotocatodo.

Estes elétrons por sua vez, são focalizados e acelerados entre os dinodos através do campo elétrico produzido por uma diferença de tensão aplicada à fotomultiplicadora (tensão de operação). Geralmente cada elétron “arranca” de 3 a 5 novos elétrons. O ganho de corrente para uma fotomultiplicadora típica de 10 estágios é da ordem de 10^6.

Quando os elétrons chegam ao anodo, a corrente flui através de uma resistência e causa uma queda na tensão e é gerado um pulso que será posteriormente contado e discriminado. Este pulso negativo (no caso do detector cintilador NaI) tem em geral, uma amplitude de poucos milivolts. Este sinal é amplificado e direcionado ao módulo de discriminação de energia (analisador de altura de pulso) do conjunto de medidas para ser contado.

A espectroscopia de uma fonte de radiação usando um detector cintilador envolve a medida da distribuição de energia das partículas gama produzida pelo decaimento dos núcleos dos átomos radioativos presentes na fonte (para cada transição específica é sempre mono-energética).

O detector registra os fótons com pequenas diferenças em suas energias. Este "alargamento" na energia característica ocorre porque a energia da transição gama não é registrada pela eletrônica do sistema de detecção de maneira idêntica para todas as transições devido a:

- Possíveis variações estatísticas na produção dos elétrons no cristal de NaI;
- Possível não uniformidade dos fotocatodos;
- Presença de ruído eletrônico;
- Pequenas variações na tensão de operação da fotomultiplicadora.

Um espectro típico para uma fonte de ^{137}Cs é mostrado na Figura 4.11.

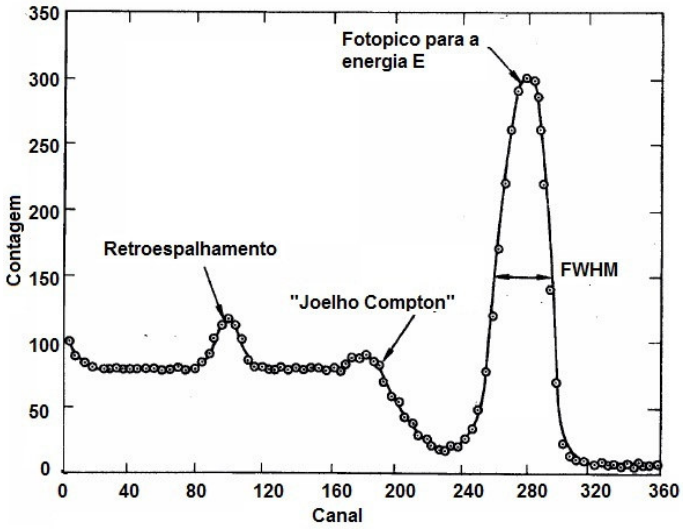


Figura 4.11 - Espectro de uma fonte de empregando um detector cintilador NaI. [46]

Este alargamento do fotopico é um dado usado para caracterizar o detector cintilador e é chamado de "Resolução em Energia". Este parâmetro avalia a capacidade do detector cintilador distinguir dois raios gama com energias próximas, dado pela Equação 4.6:

$$R = \frac{\Delta E}{E} \qquad R = \frac{\text{FWHM}}{\text{Número do canal do centróide do fotopico}} \tag{4.6}$$

Onde:

FWHM - Largura a meia altura do fotopico (em canais).

A espectrometria gama de alta resolução é um método conveniente para medir a atividade de substâncias radioativas emissoras de raios gama. O espectro de todos os fótons que interagem com o material no interior do volume sensível do detector é registrado.

Átomos radioativos emitem um espectro discreto de fótons, determinando picos no espectro que correspondem a estas energias de fótons devido às interações que conduzem à absorção integral da energia dos fótons dentro do volume sensível. A eficiência de um detector é uma medida da quantidade de pulsos que ocorrem devido a um determinado número de raios gama. Várias definições de eficiência são de uso

comum para os detectores de raios gama:

- **Eficiência absoluta**: é a razão entre o número de contagens produzidas pelo detector e o número de raios gama emitido pela fonte em todas as direções;
- **Eficiência intrínseca**: é a razão entre o número de pulsos produzidos pelo detector e o número de raios gama que incidem no detector;
- **Eficiência relativa:** depende das propriedades do detector, das propriedades da fonte radioativa e da relação geométrica do sistema fonte-detector.

  Exemplo: um detector NaI de 3x3" com fonte pontual de ^{137}Cs distanciada de 5.0 cm em relação ao centro do detector e a mesma fonte posicionada a 10 cm do detector.

Para qualquer detector, a eficiência é função das características do sistema de contagem (fonte+detector) e depende das dimensões da fonte e do detector, da composição do cristal cintilador, da distância da amostra a partir do detector e da energia dos fótons. Quando se está interessado na medida da atividade das amostras ou na comparação de resultados de mais de um conjunto de detectores, a eficiência de contagem para cada detector deve ser conhecida.

Normalmente, a incerteza no valor da eficiência é o principal fator que influencia a incerteza dos resultados calculados. Assim a medição e/ou cálculo da eficiência de contagem tem de ser feito com o maior cuidado e precisão.

Quando uma fonte pontual de radiação se situa no eixo de um detector cilíndrico, a expressão matemática para o cálculo da eficiência absoluta é dada pela Equação 4.7: [47]

$$\varepsilon = \frac{N_P}{p} \cdot \frac{1}{A_0 \cdot \exp^{-\lambda t_c}} \cdot 100 \qquad (4.7)$$

Onde:

N_P - Número de contagens registrado;

p - Probabilidade de decaimento para a energia E_σ (valor tabelado);

A_0 - Atividade da amostra padrão (valor tabelado);

λ - Constante de decaimento para o radionuclídeo estudado (valor tabelado);

t_c - Tempo decorrido entre a medida da atividade A_0 e a medida realizada.

5 - METODOLOGIA

5.1 - Cálculo da Velocidade de Arraste pela Técnica da Medida da Função "Cross-Correlation"

Técnicas que correlacionam a dependência entre sinais randômicos podem ser usadas para levantamento de parâmetros dinâmicos do deslocamento das pelotas sólidas no mineroduto. Essa dependência temporal entre os dois sinais aleatórios pode ser medida pela Função Cross-Correlation (FCC) entre os sinais, com o coeficiente de correlação descrevendo a dependência temporal do primeiro detector em relação ao segundo.

Assim ao registrar um sinal do segundo detector, y(t), em determinado ponto da secção reta do duto, a FCC permite descrever como esse sinal é afetado pela interferência de processos físicos que estão ocorrendo durante o deslocamento da fase sólida, quando comparado com um sinal registrado anteriormente pelo primeiro detector, x(t).

A FCC é dada pela Equação 5.1, conhecida por Equação da Convolução:

$$R_{xy}(\tau) = x(t) \otimes y(t) = \frac{1}{T} \int_0^T x(t-\tau) \cdot y(t)\, dt \qquad (5.1)$$

Onde:

R_{xy} - Função Cross-Correlation entre x(t) e y(t);

T - Tempo total entre o início e o fim da amostragem de x(t) e y(t);

τ - Transiente de tempo entre os eventos de x(t) e y(t);

x (t) - Sinal registrado pelo primeiro detector em função do tempo (sinal de entrada);

y (t) - Sinal registrado pelo segundo detector em função do tempo (sinal de saída).

A FCC tem as seguintes características:

- Apresenta sempre valores reais, podendo ser positiva ou negativa;
- Apresenta um ou mais picos, sendo o seu máximo definido como o valor da correlação temporal de x(t) e y(t);
- Se x(t) e y(t) são independentes, a FCC será nula (não existe correlação entre

os conjuntos).

A função Rxy é uma função distribuição de probabilidades e é usual usar o valor normalizado denominado Coeficiente de Correlação dado pela Equação 5.2:

$$\rho_{xy}(t) = \frac{R_{xy}(t)}{\sqrt{R_{xx}(0) \;.\; R_{yy}(0)}} \tag{5.2}$$

Onde:

R_{xx} (0) - Função autocorrelação de x(t), para t=0;

R_{yy} (0) - Função autocorrelação de y(t), para t=0;

R_{xy} (t) - Função Cross-Correlation entre x(t) e y(t).

Uma vantagem específica dessa metodologia é que qualquer sinal externo presente não interfere na medida da FFC, ou seja, medida da FCC é independente da presença de ruídos (eletrônicos, estatísticos, etc.) já que não existe nenhuma correlação entre sinais randômicos. Isto é comprovado considerando a presença de ruídos nos sinais registrados nos detectores x(t) e y(t). Se $r_x(t)$ e $r_y(t)$ forem os sinais dos ruídos randômicos associados aos sinais reais $x_R(t)$ e $_{yR}(t)$, então:

$$\begin{aligned} x(t) &= x_R(t) + r_x(t) \\ y(t) &= y_R(t) + r_y(t) \end{aligned} \tag{5.3}$$

Substituindo (5.3) em (5.1) e usando da propriedade distributiva da FCC, temos a Equação 5.4:

$$R_{xy}(\tau) = x(t) \otimes y(t) = \left[x_R(t) + r_x(t)\right] \otimes \left[y_R(t) + r_y(t)\right] \tag{5.4}$$

$$R_{xy}(\tau) = \left[x_R(t) \otimes y_R(t)\right] + \overbrace{\left[r_x(t) \otimes y_R(t)\right]}^{=0} + \underbrace{\left[x_R(t) \otimes r_y(t)\right]}_{=0} + \underbrace{\left[r_x(t) \otimes r_x(t)\right]}_{=0}$$

Como $r_x(t)$ e $r_y(t)$ são de natureza randômica, por definição não têm correlação alguma, logo:

$$R_{xy}(\tau) = \left[x_R(t) \otimes y_R(t) \right] \tag{5.5}$$

Esta rejeição da interferência de sinais de ruído no valor da FFC torna a metodologia indicada para medidas de vazão em sistemas industriais, com a possibilidade de serem instalados dispositivos mesmo onde a possibilidade de ruído de qualquer natureza seja muito alta. [48]

O gradiente de tempo entre os dois sinais registrados pelos detectores 1 e 2 é dado pelo ponto de máximo da curva do coeficiente de correlação, τ, denominado transiente de tempo entre x(t) e y(t). Assim se "L" for a distância média entre os planos de medida das regiões 1 e 2, então a velocidade de arraste (v) é dada pela Equação 5.6:

$$v = \frac{L}{t_{max}} = \frac{L}{\tau} \tag{5.6}$$

Onde:

L - Distância entre os detectores;

τ - Valor de tempo correspondente ao máximo da função do coeficiente de correlação

A incerteza associada à velocidade de arraste calculada pela Equação 5.6 é dada pela Equação 5.7:

$$\Delta v = \left(\frac{L}{\tau}\right) * \sqrt{\left(\frac{\Delta L}{L}\right)^2 + \left(\frac{\Delta \tau}{\tau}\right)^2} \tag{5.7}$$

Onde:

ΔL - Incerteza associada a L;

$\Delta\tau$ - Incerteza associada a τ.

5.1.1 - Métodos para Cálculo da Função Cross-Correlation

Em um sistema bifásico como o do mineroduto, para a determinação correta da velocidade da fase sólida (pelotas de minérios) é necessário que os dados registrados pelos detectores cintiladores do sistema de contagem tenham uma frequência de amostragem menor que a velocidade de deslocamento das pelotas, ou seja, o intervalo de tempo entre cada dado sucessivo deve ser muito menor que a velocidade de arraste das pelotas. Outra condição importante é que o período de amostragem seja maior que o transiente de tempo que será medido. [49]

Estas duas condições impõem que num caso real o intervalo de tempo entre duas contagens seja da ordem de 10^{-2} s e que o período de amostragem seja da ordem de 10^{1} s.

Também o valor da FCC pode ser afetado devido à possível mistura causada por turbulência na região compreendida entre os dois planos de medidas dos detectores D1 e D2. Em princípio, a determinação do transiente de tempo a partir da medida da FCC é possível por meio de dois diferentes métodos estatísticos:

- Método Direto
- Método da Transformada de Fourier.

5.1.1.1 - Cálculo da FCC pelo Método Direto

Sejam dois conjuntos de dados x(t) e y(t), a equação da convolução permite o cálculo do valor da FCC por meio de métodos numéricos. Considerando que cada dado é registrado para cada intervalo de tempo (t), a equação pode ser reescrita conforme a Equação 5.8:

$$R_{xy}(j.\Delta t) = \frac{1}{N} \sum_{n=1}^{N} x_n y_{n+j} \quad \text{com} \quad j=0,1,2,3, \ldots , J \qquad (5.8)$$

Onde:

N - Número total de dados em cada conjunto;

J - Janela de dados, número de dados a serem correlacionados no conjunto y(t);

x_n - Dados do conjunto x (t) para $t = n\Delta t$;

y_n - Dados do conjunto y (t) para $t = n\Delta t$;

Δt - Intervalo de tempo entre duas medidas sucessivas.

Dois são os processos que podem ser empregados no cálculo da função FCC pelo método Direto:

- **Ponto-a-Ponto**: neste método cada valor da FCC é calculado considerando a janela de dados J, e a equação é subdividida em j equações individuais dadas pela Equação 5.9:

$$\begin{aligned}
R_{xy}(0) &= x_1y_1 + x_1y_1 + x_1y_1 + ... + x_Ny_N \\
R_{xy}(\Delta t) &= x_1y_2 + x_1y_3 + x_1y_4 + ... + x_Ny_{N+1} \\
R_{xy}(2\Delta t) &= x_1y_3 + x_1y_4 + x_1y_5 + ... + x_Ny_{N+2} \\
&\vdots \\
R_{xy}(j\Delta t) &= x_1y_j + x_1y_{j+1} + x_1y_{j+2} + ... + x_Ny_{N+j}
\end{aligned} \tag{5.9}$$

O valor do transiente de tempo é o valor de tempo correspondente ao máximo da curva $R_{xy}(n\Delta t)$.

- **Evolutivo:** neste método a equação é reordenada, e cada novo termo é chamado de evolução.

$$R_{xy} = \underbrace{x_1\begin{pmatrix} y_1 \\ y_2 \\ y_3 \\ \dots \\ y_j \end{pmatrix}}_{\text{1ª evolução}} + \underbrace{x_2\begin{pmatrix} y_1 \\ y_2 \\ y_3 \\ \dots \\ y_j \end{pmatrix}}_{\text{2ª evolução}} + \underbrace{x_3\begin{pmatrix} y_1 \\ y_2 \\ y_3 \\ \dots \\ y_j \end{pmatrix}}_{\text{3ª evolução}} \dots + \underbrace{x_N\begin{pmatrix} y_1 \\ y_2 \\ y_3 \\ \dots \\ y_j \end{pmatrix}}_{\text{J-éssima evolução}} \tag{5.10}$$

O valor do transiente de tempo é calculado em cada evolução e à medida que o número de evoluções cresce, o valor do transiente de tempo converge para o valor do máximo da curva. São necessárias diversas evoluções para determinar o transiente de tempo com precisão.

5.1.1.2 - Cálculo da FCC pelo Método da Transformada de Fourier

A Transformada Rápida de Fourier (FFT) e o Teorema da Convolução são as ferramentas usadas para construir as funções de correlação dos dados experimentais registrados pelos detectores. Assim no domínio de frequências tem-se:

$$\begin{aligned} FFT[\, x(t)\,] = F[x(t)] &= X(f) = \text{Real } X(f) + \text{Imag } X(f) \\ FFT[\, y(t)\,] = F[y(t)] &= Y(f) = \text{Real } Y(f) + \text{Imag } Y(f) \end{aligned} \qquad (5.11)$$

Onde:

Real X (f) - Componente real da Transformada de Fourier de x(t);
Imag X (f) - Componente real da Transformada de Fourier de x(t);
F [x(t)] - Operador que calcula a Transformada de Fourier de x(t);
Real Y (f) - Componente real da Transformada de Fourier de y(t);
Imag Y (f) - Componente real da Transformada de Fourier de y(t);
F [y(t)] - Operador que calcula a Transformada de Fourier de y(t).

Usando o teorema da convolução podemos escrever:

$$R_{xy}(\tau) = F^{-1}\,[\, F[x(t) \otimes y(t)]\,] = F^{-1}\,[X^*(f) \,.\, Y(f)] \qquad (5.12)$$

Onde:

$X^*(f)$ - Conjugado complexo de X(f);

F^{-1} [X(f)] - Operador que calcula a Transformada Inversa de Fourier de X(f).

Medidas da velocidade de arraste das pelotas sólidas dentro de um mineroduto podem ser obtidas através da avaliação da FCC por meio dos sinais registrados da quantidade de fótons de radiação gama transmitidos devido à passagem do material sólido no interior do duto, por dois conjuntos distintos fonte/detector adequadamente posicionados (relativamente próximos um do outro de modo que perturbações no perfil de fluxo sejam desprezíveis).

O Coeficiente de Correlação no espaço de tempo é dado aplicando-se a transformada inversa de Fourier na equação da convolução:

$$R_{xy}(t) = F^{-1}[(\text{RealX}(f) - \text{ImagX}(f)\,) \otimes (\text{RealY}(f) - \text{ImagY}(f)\,)] \qquad (5.13)$$

O transiente de tempo entre os dois sinais é dado pelo valor de tempo correspondente ao máximo de $R_{xy}(t)$. Como esta função é uma função estatística, podemos calcular o transiente de tempo como o primeiro momento estatístico de $R_{xy}(t)$ e a variância associada ao transiente de tempo como o segundo momento estatístico, ou seja: [54]

$$\tau = \frac{\int_0^T t * R_{xy}(t)\, dt}{\int_0^T R_{xy}(t)\, dt} \qquad \text{1º momento}$$

$$S_\tau^2 = \frac{\int_0^T (t - \tau)^2 * R_{xy}(t)\, dt}{\int_0^T R_{xy}(t)\, dt} \qquad \text{2º momento} \qquad (5.14)$$

Onde:

τ - Transiente de Tempo entre x(t) e y(t);

S^2 - Variância associada a τ.

5.2 - Técnica da Densitometria Gama para o Cálculo da Velocidade de Arraste de Pelotas

Técnicas baseadas na transmissão de radiação gama em meios absorvedores como, por exemplo, a técnica densitometria gama permite o uso de dispositivos não invasivos, relativamente compactos e de baixo custo. Estes dispositivos possibilitam a avaliação detalhada das características do fluxo como a distribuição das partículas sólidas, sua concentração no meio e sua velocidade de deslocamento. [50]

Uma fonte de radiação gama, selada e blindada, com energia e intensidade suficientes para penetrar e ser transmitida por todo o duto é posicionada em um dos seus lados e um detector cintilador NaI é instalado também externamente ao mineroduto e diametralmente oposto à fonte, com a finalidade de registrar a taxa de contagem do feixe de fótons gama espalhados.

Considerando como primeira aproximação um modelo simplificado, com as fases líquida e sólida se deslocando em um duto com secção reta quadrada, e ainda sendo conhecidas as dimensões e as características do duto, do fluido de transporte e

do material sólido, pode-se dizer que a intensidade do feixe transmitido é calculada por:

$$I = I_0 \cdot \exp^{(-\mu_s . x_s \; -\mu_A . x_A \; -2\mu_d . x_d)} \qquad (5.15a)$$

Onde:

I_0 - Intensidade da radiação da fonte;

I - Intensidade da radiação transmitida;

μ - Coeficiente de absorção de massa;

x - Espessura equivalente do meio;

S - Componente da fase sólida;

A - Componente da água;

d - Componente do duto.

Considerando:

Diâmetro interno do duto: $D = x_S + x_A$

Percentagem de volume da fase sólida: $\alpha_S = \frac{x_S}{D}$

Percentagem de volume da fase líquida: $\alpha_A = \frac{x_A}{D}$

Espalhamento provocado pelas paredes do duto: $\theta = \exp^{(-2.\mu_d . D)}$

Dessa forma, a Equação 5.15a pode ser reescrita como:

$$I = I_0 \cdot \theta \cdot \exp^{(-\mu_s . x_s \; -\mu_A . x_A)} \qquad (5.15b)$$

Esta primeira aproximação permite demonstrar que as variações na intensidade do sinal registrado no detector estão diretamente relacionadas com a variação das frações de volume sólido/líquido do meio. [51]

5.3 - Simulação do Deslocamento de Pelotas de Minério no Interior de um Mineroduto

Uma das condições de se medir adequadamente a vazão em dutos indústrias é que o dispositivo utilizado não obstrua o fluido, e, no caso de um mineroduto, que o dispositivo também não entre em contato com o meio abrasivo das pelotas se deslocando no interior do duto. A associação da metodologia da FCC com a característica de penetrabilidade da radiação gama torna os dispositivos que empregam estas duas técnicas muito adequados para um mineroduto.

Inicialmente foram simuladas situações de pelotas sólidas se deslocando em meio líquido (água) estático como pulsos quadrados invertidos, onde o mínimo do pulso corresponde ao máximo de transmissão dos fótons gama. Este procedimento será utilizado com a finalidade de avaliar o melhor método para o cálculo da FFC.

Já a melhor geometria do sistema fonte/detector foi determinada empregando o código MCNP-X (Monte Carlo N-Particle Transport Code) - um pacote de *software* desenvolvido pelo *Los Alamos National Laboratory*, utilizado principalmente para a simulação de processos nucleares e em fenômenos de interações de partículas (gama, nêutrons, elétrons) em diferentes meios. O código MCNP-X pode ser aplicado para simular os processos de interação da radiação com a matéria a partir da distribuição de probabilidades que governam cada um dos fenômenos físicos evolvidos (espalhamento coerente, efeito fotoelétrico, efeito Compton) que ocorrem devido à presença tanto da água como das pelotas de minério.

Por meio da simulação de um grande número de eventos, foram obtidas informações relativas ao valor de quantidades macroscópicas para a geometria utilizada. A capacidade de tratamento de geometrias complexas tridimensionais e a variedade de opções de dados de entrada fazem do código MCNP-X uma ferramenta poderosa e conveniente na modelagem de diferentes arranjos experimentais, principalmente para a otimização do sistema fonte/detector de um densitômetro gama. A taxa de contagem de fótons que atingem o detector foi calculada para diferentes arranjos fonte/detector variando os seguintes parâmetros:

- **Características da fonte:** dimensão, atividade e energia do fóton de radiação gama;
- **Tipo de detector:** dimensão, colimação e posicionamento angular com relação ao eixo normal da fonte.

6 - MATERIAIS E MÉTODOS

6.1 - Sistema de Aquisição de Dados

A metodologia da medida da função Cross-Correlation exige o emprego de dois conjuntos independentes fonte/detector. Para que os resultados das medidas registradas nestes sistemas independentes pudessem ser analisados e comparados foi necessário que cada conjunto de medida, composto pelo detector e módulo eletrônico associado a ele, fosse adequadamente calibrado. Esta foi uma condição fundamental para garantir resultados com medidas precisas, principalmente em situações onde a relação sinal/ruído era ruim. Uma fonte de radiação gama selada de ^{241}Am, cujo espectro encontra-se ilustrado na Figura 6.1:

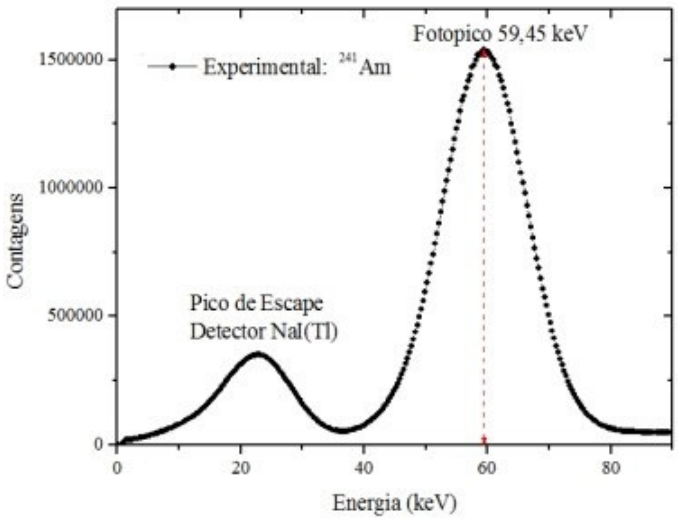


Figura 6.1 – Espectro da fonte de ^{241}Am utilizada nos testes experimentais.

Os procedimentos tradicionais para a calibração de detectores cintiladores foram realizados e compreenderam o levantamento da curva característica do detector para o estabelecimento da tensão de operação, a medida da eficiência e o cálculo da resolução de energia para o valor de 59,6 keV utilizando a fonte citada anteriormente para cada um dos conjuntos de medida. Os dados para cada conjunto são mostrados na Tabela 6.1.

Tabela 6.1 - Características de operação de cada conjunto de medida.

DETECTOR	TENSÃO DE OPERAÇÃO (V)	RESOLUÇÃO (%)	EFICIÊNCIA (%)
D1	850 ± 2	9,88	31,68
D2	875 ± 2	10,19	31,75
D3	845 ± 2	8,73	32,30

O módulo de contagem Ludlum modelo 4612 é um conjunto de 12 analisadores mono-canal independentes para medidas totalmente controladas via *software* (Ludlum Measurements, Inc. Counter version 2.2.2).

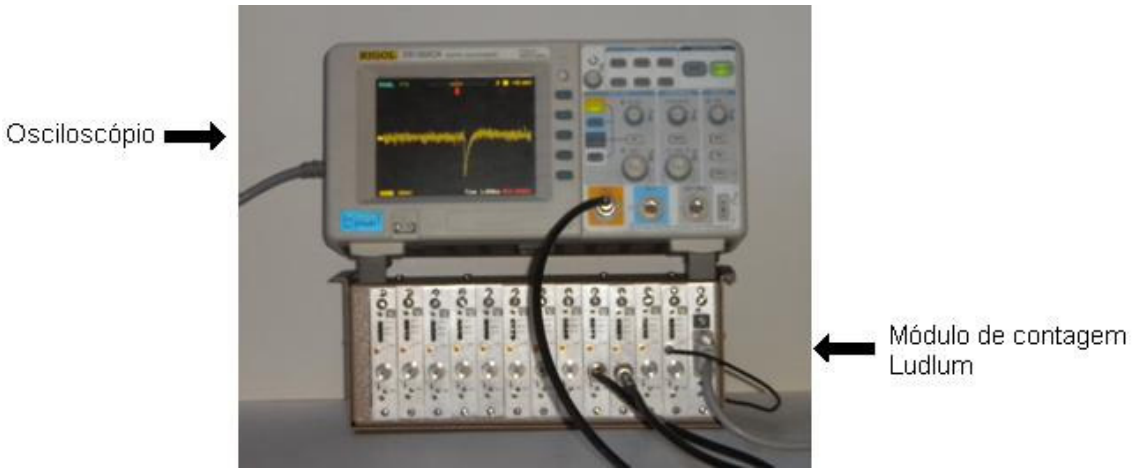


Figura 6.2 – Módulo de contagem Ludlum e o osciloscópio registrando um sinal do detector D1 para a fonte de ^{241}Am.

Para cada um dos dois detectores cintiladores acoplados, o módulo de contagem permite ajustar a tensão de operação e a janela de discriminação de pulsos. Esse módulo permite a aquisição contínua de dados com uma frequência mínima de 20Hz (20 dados/segundo) para cada detector acoplado.

Após a aquisição total dos dados, os resultados das contagens foram salvos em um arquivo no HD (*hard disk*) do computador. Além disso, permite a variação das janelas de discriminação de pulsos por meio da definição dos valores do nível de discriminação inferior e superior (Figura 6.3). Essa característica permite ao usuário verificar com o auxilio de um osciloscópio o nível de ruído e o nível do sinal dos fótons gama da fonte radioativa e fixar o valor de discriminação inferior para minimizar a contribuição do ruído no sinal, e o valor do nível superior de maneira que a contagem registrada seja somente devida à energia do fotopico de 59,6 keV da fonte de ^{241}Am.

A aquisição dos sinais dos dois conjuntos fonte/detector foi inicializada e o tempo total de aquisição foi definido segundo as necessidades de cada experimento. Terminado esse processo, o arquivo com os dados armazenados foi processado, e os resultados da CPS (contagens por segundo) foram plotados.

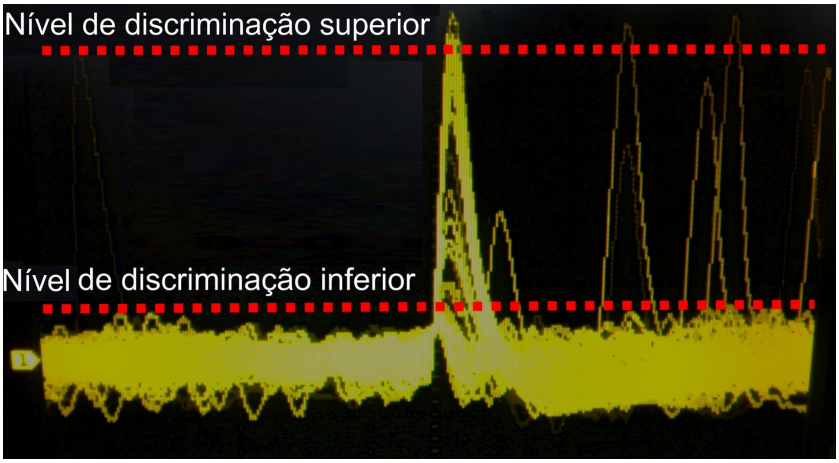


Figura 6.3 – Janela de discriminação de pulsos, onde estão indicados o nível inferior e nível superior.

O resultado para um experimento considerando o deslocamento de 17 esferas de cimento com 2,0 cm de diâmetro é mostrado na Figura 6.4.

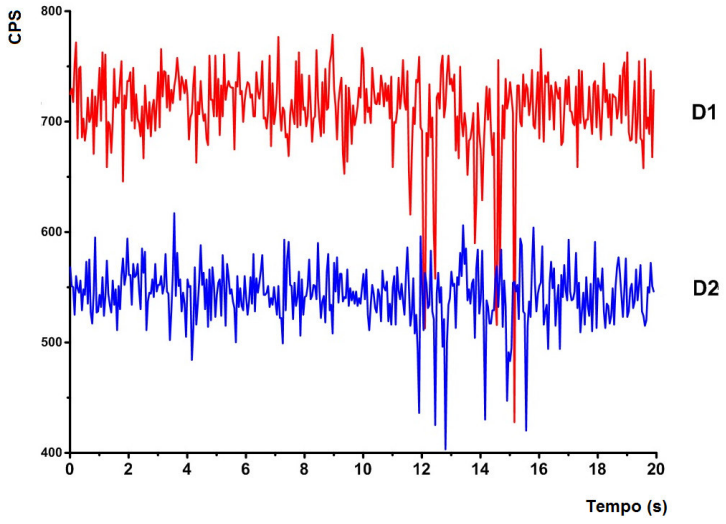


Figura 6.4 – Resultado do experimento com 17 esferas de cimento possuindo 2,0 cm de diâmetro para o detector D1 e o detector D2.

6.2 - Confecção de Corpos de Prova

Para a simulação de minério movimentando-se no mineroduto, foram fabricadas artesanalmente pelotas sólidas com variação de densidade e forma geométrica com o auxílio de fôrmas de silicone.

Como o objetivo do trabalho foi desenvolver uma metodologia que permitisse

medir a velocidade de deslocamento do minério, numa primeira fase optou-se por produzir pelotas com densidade média um pouco acima da densidade da água, pois assim a pelota se movimentaria com velocidade mais lenta, possibilitando a calibração do sistema de medida de maneira adequada. Como se desejou simular uma diversidade de situações de um mineroduto, após estes testes iniciais foram fabricadas pelotas com densidades maiores.

A escolha da composição dos corpos de prova a ser utilizada nos testes dependeu fundamentalmente da liga que apresentou a melhor homogeneidade e a melhor rigidez, bem como a que possibilitou a menor absorção de água. A preocupação com esses parâmetros decorre do fato que uma densidade inferior a da água faria com que a pelota flutuasse e não se deslocasse, por sua vez densidade igual a da água não provocaria diferenças no espalhamento dos fótons gama, como mostrado na Equação 5.15b. A impermeabilidade dos corpos de prova é uma característica importante, pois caso ocorresse dissolução do material da pelota quando esta fosse colocada na água, resultaria numa alteração da densidade do meio (água) e também da massa de cada sólido.

Na confecção das pelotas foram utilizados diversos elementos com densidades diferentes (poliestireno, celulose, cimento, cimento branco, massa acrílica, gesso) para obter-se pelotas com densidades ligeiramente variadas e próximas à da água para que o sistema de medição fosse capaz de registrar algum sinal quando da passagem do sólido através do sistema fonte-detector (adotando-se como referência o valor de 1,0 g/cm^3 para a densidade da água).

Decidiu-se por fabricar uma liga com o máximo de componentes distintos, logo foram três, pois assim seria possível determinar as frações relativas de cada componente, mas necessariamente deveria haver um elemento com densidade menor à da água (poliestireno ou celulose) e mais outros dois com densidades superiores (para que fosse possível obter pelotas com densidades próximas à da água). As combinações de ligas ternárias foram:

- Poliestireno/massa acrílica/gesso;
- Poliestireno/gesso/cimento;
- Poliestireno/massa acrílica/cimento;
- Celulose/massa acrílica/gesso;
- Celulose/gesso/cimento;
- Celulose/massa acrílica/cimento.

Para obter um corpo de prova com densidade estabelecida de

aproximadamente 1,1 g/cm³, foi necessário estabelecer montado um conjunto de equações que permitisse fixar o valor das frações relativas de cada um dos componentes (Equações 6.1 e 6.2):

$$X + Y + Z = 1.0 \quad (6.1)$$

$$\rho_x.X + \rho_y.Y + \rho_z.Z = 1.1 \quad (6.2)$$

Onde:
X, Y, Z - Fração de massa relativa a cada um dos elementos;
ρ_x, ρ_y, ρ_z - Densidade média dos componentes X, Y e Z

Observação: Por se tratar de um sistema de equações lineares sem solução (por possuir duas equações e três incógnitas) tornou-se necessário utilizar recurso computacional (programa *Microsoft Excel*) para determinar a fração de cada elemento constituinte da liga. De posse dos valores das frações relativas de cada elemento da liga calculado puderam ser fabricados os corpos de prova.

Figura 6.5 - Pelotas produzidas para simulação de minério no mineroduto.

Nos testes foram utilizadas as seguintes pelotas:

- P1 – Esfera de cimento possuindo 3 cm de diâmetro (Figura 6.6 (a)).
- P2 – Esferas composta por: 10% poliestireno + 10% gesso + 80 % cimento, possuindo 2 cm de diâmetro (Figura 6.6 (b)).
- P3 – Esferas composta por: 10% celulose + 10% gesso + 80 % gesso, possuindo 1 cm de diâmetro (Figura 6.6 (c)).

- P4 – Cubo composto por: 10% celulose + 45% gesso + 45 % cimento, possuindo 2 cm de aresta (Figura 6.6 (d)).
- P5 – Cubo composto por: 40% poliestireno + 30% gesso + 30 % cimento, possuindo 3 cm de aresta (Figura 6.6 (e)).

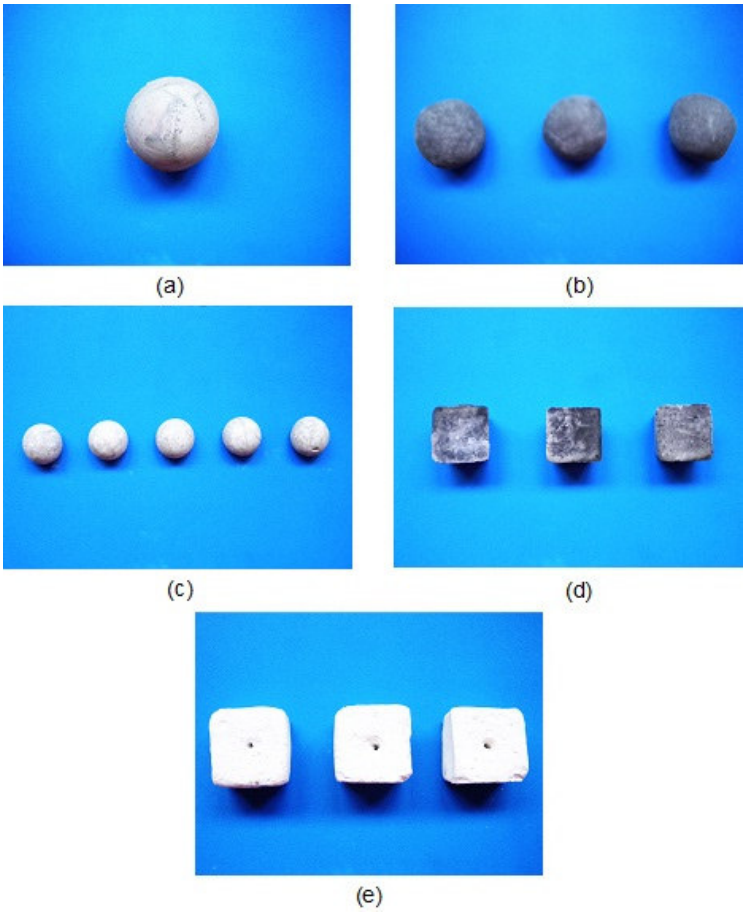
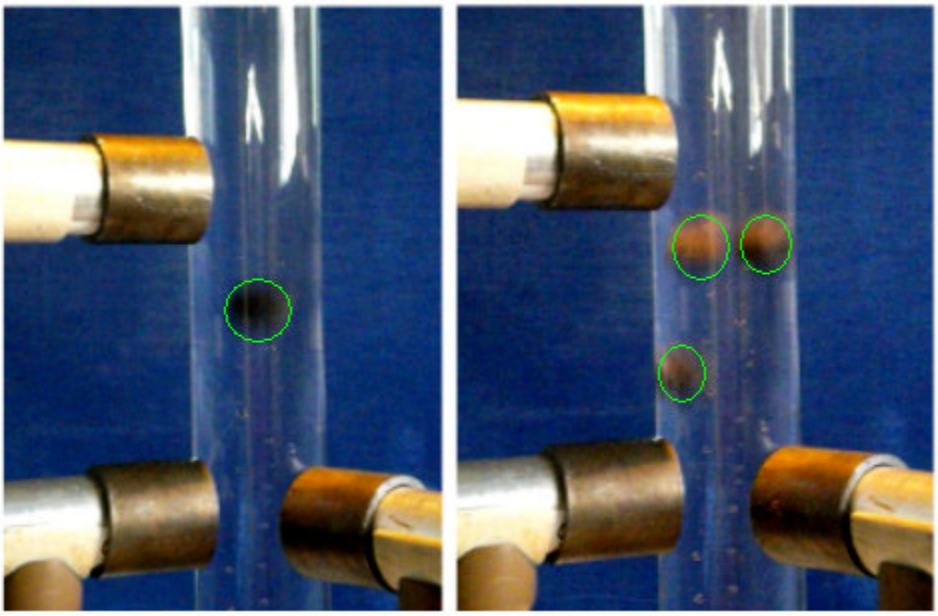


Figura 6.6 - Corpos de prova utilizados nos testes experimentais: (a) P1; (b) P2; (c) P3; (d) P4; (e) P5.

Nos testes experimentais, as pelotas sólidas foram liberadas em queda livre, (com velocidade inicial nula) estando o tubo totalmente preenchido com água. Inicialmente liberou-se individualmente as pelotas em intervalo de tempo regular, como mostrado na Figura 6.7a, e em seguida liberando um conjunto de pelotas de forma aleatória (Figura 6.7b).

Diferente da simulação matemática que se fundamentou no deslocamento da pelota em uma trajetória retilínea, as pelotas descreveram trajetórias irregulares e, quando da adição de um conjunto, notou-se que havia interação entre elas (colisões), evidenciando a complexidade do que é o movimento real do minério no interior do mineroduto.



(a) (b)

Figura 6.7 - Deslocamento de pelota do tipo P1 no mineroduto: (a) individual e (b) em conjunto.

6.3 - Unidade de Simulação de Mineroduto

O conjunto de medidas denominado unidade estática é composto por uma armação de aço que tem por principal finalidade dar suporte ao duto de acrílico (mantido fixo na posição vertical com auxilio de três grampos de aço em formato de “U” com parafuso) para escoamento das pelotas foram utilizadas duas válvulas controladoras de vazão e um tubo curvo de PVC 45º, o qual visa facilitar o escoamento das pelotas após passarem pela secção de teste. No final da tubulação foi colocada uma caixa de PVC, que teve por finalidade coletar as pelotas para serem reutilizadas. Todo o conjunto é mostrado na Figura 6.8.

As duas válvulas controladoras foram acrescentadas para minimizar o gasto de água nos testes experimentais. Inicialmente o sistema encontrava-se com a válvula controladora superior aberta e a inferior fechada. Após cada teste experimental para que a parte superior do tubo fosse bloqueada, a primeira válvula foi fechada e a remoção das pelotas só ocorreu quando a segunda válvula foi aberta. Portanto, este sistema de controle de válvulas possibilitou um gasto mínimo de água em cada teste experimental, evitando-se assim desperdício, bem como reduziu o tempo entre um experimento e outro.

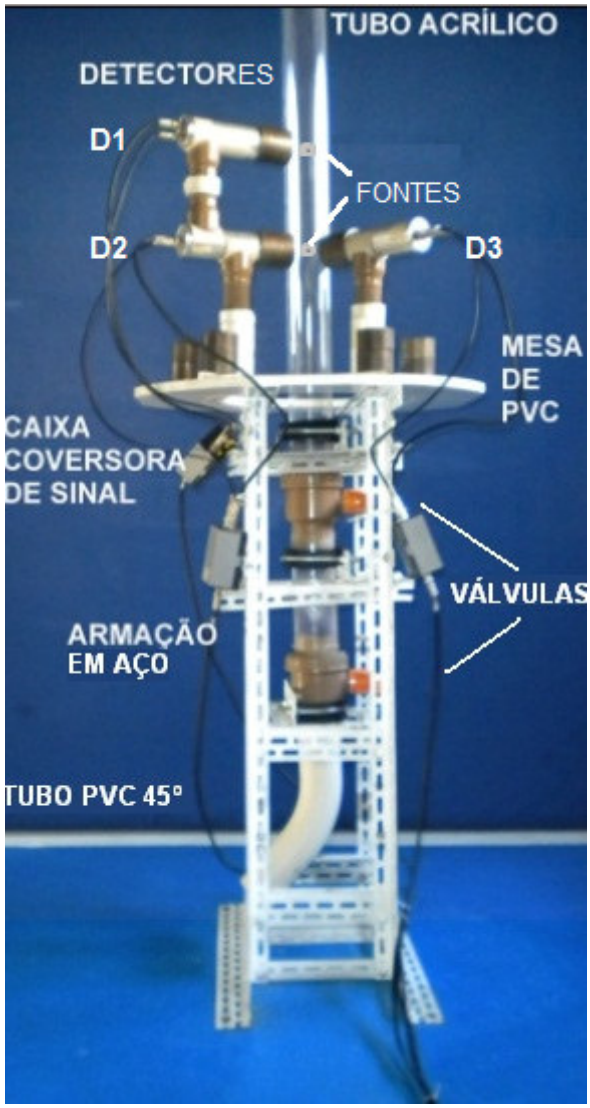


Figura 6.8 - Unidade Estática para simulação de um mineroduto.

Na parte superior da armação em aço foi acoplada uma plataforma de PVC rígido, onde foram instalados três suportes para os detectores cintiladores. Estes suportes puderam ser deslocados em torno do tubo de acrílico e também puderam ser posicionados segundo um arranjo previamente definido. Um dos suportes permitiu a instalação de dois detectores cintiladores alinhados e separados por 18,0 cm, denominados D1 e D2, que foram empregados para o registro da movimentação das pelotas, ou seja, para a medida da velocidade de arraste.

Para cada detector foi posicionada na face diametralmente oposta do tubo de acrílico, a fonte radioativa de ^{241}Am. O sistema de medida permitiu ainda a instalação de um terceiro detector, D3, coplanar a D2, mas em uma direção correspondente a um ângulo de 90º em relação à fonte. O sinal de D3 pode ser empregado para a medida da correlação de fase e da função correlação entre D2 e D3, cujo resultado permite

estudar o perfil do deslocamento das pelotas. Entretanto, isto será objeto de um estudo posterior a ser realizado pelo grupo de trabalho do Laboratório de Traçadores Radioativos do IEN. O conjunto de detectores cintiladores instalado é mostrado em detalhes na Figura 6.9.

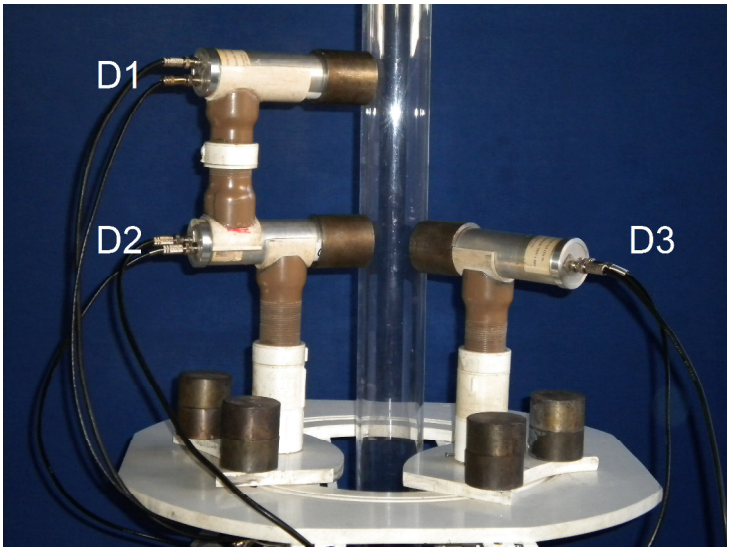


Figura 6.9 - Detectores cintiladores NaI instalados na Unidade Estática.

Cada detector foi conectado a dois cabos coaxiais, um que fornece a tensão de operação da fotomultiplicadora e o outro que retorna o sinal dos pulsos gama registrados no cristal cintilador. Esses cabos foram conectados a uma caixa conversora de sinal para promover o ajuste de impedância entre o detector e o módulo de aquisição de dados.

6.4 - Simulação do Deslocamento de Pelotas de Minério Utilizando Pulso Quadrado como Sinal no Detector Cintilador

Antes da realização dos testes experimentais para medida da velocidade de arraste no mineroduto, efetuou-se a modelagem matemática do deslocamento de uma pelota de minério em meio líquido. Esta etapa foi importante, pois permitiu a verificação da validade dos procedimentos de cálculo da velocidade de arraste da pelota.

Como dados de entrada, foram fornecidos os resultados das contagens registradas nos detectores considerando um valor teórico para o transiente de tempo

de 0,28 s (calculado a partir de equações da cinemática), e os programas calcularam um valor dentro de um limite de precisão pré-determinado, da ordem de 1%. A Figura 6.10 representa um esquema do conjunto usado na simulação de pulsos de pelotas em queda livre na água utilizando o código MCNP-X.

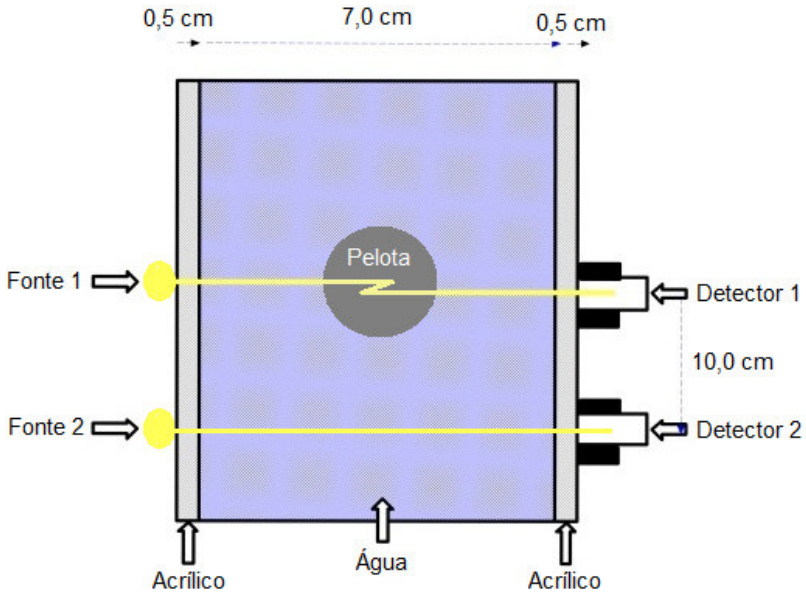


Figura 6.10 - Esquema da simulação de pelota de minério se deslocando em meio líquido utilizando o código MCNP-X.

O programa de simulação considera as pelotas sólidas como esferas perfeitas, por esta razão foi estabelecido que na etapa de confecção dos corpos de prova o formato seria preferencialmente esférico para que fosse possível comparar os valores simulados com os valores medidos experimentalmente. Abaixo estão apresentados os dados teóricos tabelados para os materiais:

- Fonte radioativa ^{241}Am

  Energia do fotopico: 59,6 keV

- Meio líquido: água.

  Coeficiente linear de espalhamento: 2,059 x 10^{-1} cm^2/g

  Densidade: 0,99780 g/cm^3 (22ºC)

- Meio sólido: cimento.

  Coeficiente linear de espalhamento: 8,401 x 10^{1} cm^2/g

  Densidade média: 1,40 g/cm^3

- Simulação das pelotas: considerando somente o efeito do empuxo, isto é, desprezando todo o atrito entre a água e a esfera.

- Forma da pelota: esférica.

- Aceleração da gravidade: $g = 9{,}8x10^{-2}$ cm/s^2

- Diâmetro da pelota: 3,0 cm.

- Aceleração de queda: 2,81 cm/s^2

- Tipo de movimento: MRUV (movimento retilíneo uniformemente variado).

Considerando que as pelotas foram lançadas com velocidade inicial nula, pode-se calcular a velocidade e a posição para cada intervalo de tempo (igual ao intervalo de tempo do sistema de aquisição, neste caso 50 ms).

Para cada tempo, a posição central da esfera e a velocidade foram calculadas e assim foi obtida a taxa de contagem dos fótons gama transmitidos e registrados no detector cintilador.

A primeira aproximação foi considerar o sinal da passagem da pelota pelo detector NaI do tipo “pulso quadrado invertido”, sendo que o centro da pelota (máximo espalhamento de fótons gama) correspondia ao valor mínimo do sinal registrado no detector, e a largura do pulso (em unidades de tempo) era igual ao valor do tempo gasto para a passagem de uma esfera pela face do detector. Considerou-se ainda que o detector era totalmente blindado, e que a face dianteira de 2,54 cm totalmente exposta à radiação.

7 - RESULTADOS E DISCUSSÃO

7.1 - Avaliação do Método Matemático para Medida da Correlação dos Sinais dos Detectores

No método tradicional de aquisição e tratamento de dados, cada detector envia um sinal elétrico devido à radiação incidente em seu volume útil para o Contador de Pulsos (CPS), que realiza a totalização da taxa de contagem. Os valores medidos pelo CPS são enviados e armazenados pelo computador, por meio do *software* Ludlum Measurements, Inc. Counter version 2.2.2. [52]

Como se está trabalhando com um intervalo de tempo da ordem de 50 ms e levando em consideração que na modelagem os detectores estão distanciados a 10 cm, o tempo total para que a pelota se desloque (aceleração de queda de 2,81 cm/s^2) desde o ponto de lançamento passando pelo detector D1 até a passagem completa pelo detector D2 é da ordem de 10 s. Com esses valores tem-se então que o número total de dados em cada arquivo (referentes a D1 e D2) é de 1000 dados.

Inicialmente foi estudado cada um dos métodos de cálculo do Coeficiente de Correlação utilizando um pulso quadrado como resultado da passagem da pelota pela face do cintilador, conforme mostrado na Figura 7.1.

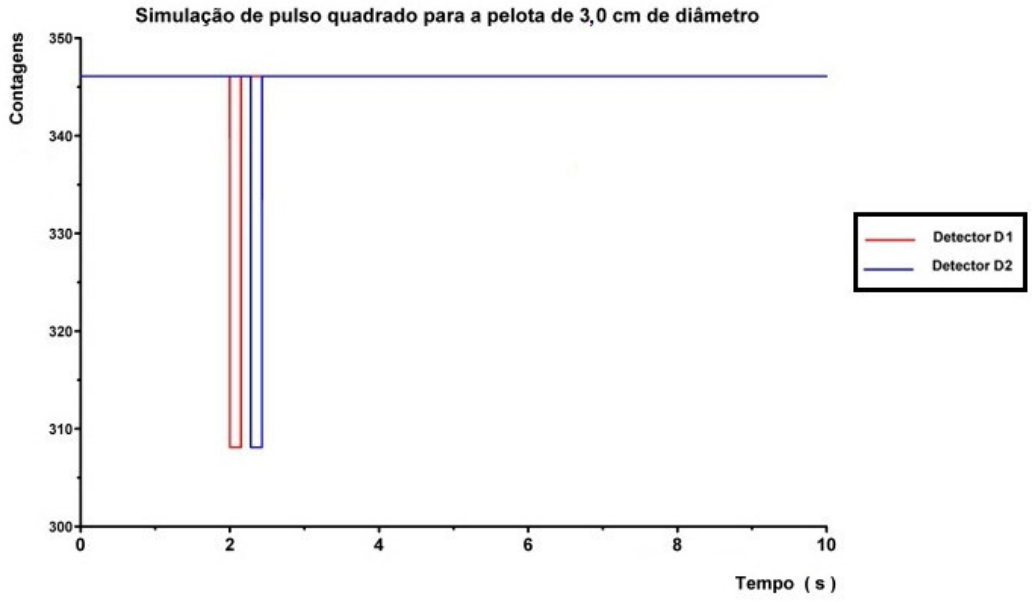


Figura 7.1 - Simulação de um pulso quadrado para uma pelota de minério possuindo 3,0 cm de diâmetro com distância entre os detectores de 10 cm.

7.1.1 - Correlator Original

O modelo de correlator é o utilizado no Laboratório de Traçadores Radioativos do IEN, que utiliza a metodologia da Transformada de Fourier para pulso com formato crescente (quadrado ou gaussiano) ou decrescente como no modelo estabelecido para a pelota. [53] O esquema do correlator encontra-se ilustrado na Figura 7.2.

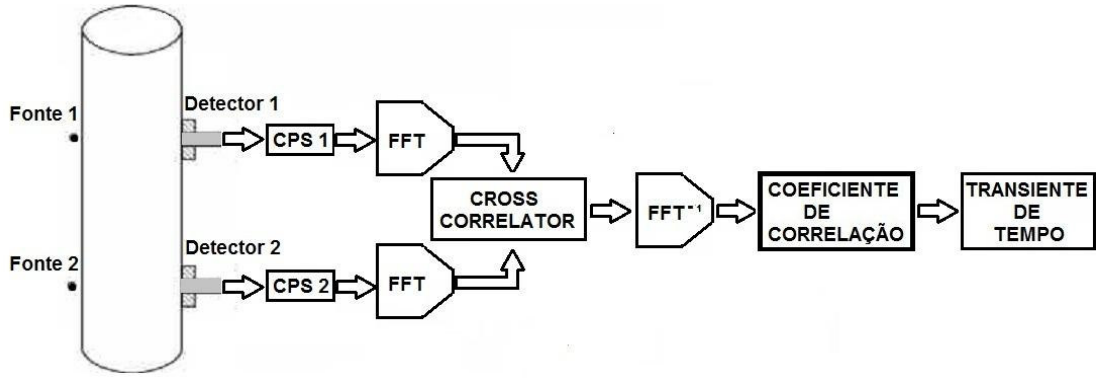


Figura 7.2 - Processo matemático clássico para o cálculo do transiente de tempo por Transformada de Fourier. [53]

Empregando o programa “CROSSCOR” (desenvolvido pelo grupo de trabalho do Laboratório de Traçadores Radioativos), o qual possui três sub-rotinas, cada cálculo da função correlação, usa em cada uma delas, métodos diferentes (Transformada de Fourier pelo: método direto; método Ponto-a-Ponto; método Direto Evolutivo).

Nos métodos Diretos, a janela de dados J é fixada como sendo igual à metade do número de dados do arquivo de entrada. Para cada caso calculou-se o Coeficiente de Correlação e o transiente de tempo para o caso simulado (esfera de cimento com 3 cm de diâmetro e em queda livre na água), usando um valor de transiente de tempo teórico igual a 0,28 s. Na Figura 7.3 nota-se que as curvas para o Coeficiente de Correlação não apresentam a forma tradicional, e nem um pico de máximo que corresponde ao transiente de tempo entre os dois eventos.

Para a curva traçada a partir da Transformada de Fourier, o ponto de máximo corresponde ao tempo t = 0,0 s, demonstrando que o transiente de tempo entre D1 e D2 é nulo, ou seja, os dois eventos teriam ocorrido ao mesmo tempo; para o caso utilizando o método Direto Evolutivo, a curva para todo o intervalo é igual a 1,0, não existindo, portanto nenhum máximo; e ao se usar o método Ponto-a-Ponto encontra-se um máximo igual a 0,0 s. O motivo dessa alteração nas curvas e no transiente de tempo foi devido ao programa “CROSSCOR” não ter sido desenvolvido para curvas de

formato inverso, como no caso dos pulsos gerados pelo deslocamento da pelota no mineroduto, motivando um novo estudo para adequar a metodologia da Transformada de Fourier para o cálculo do transiente de tempo a esses sinais de entrada.

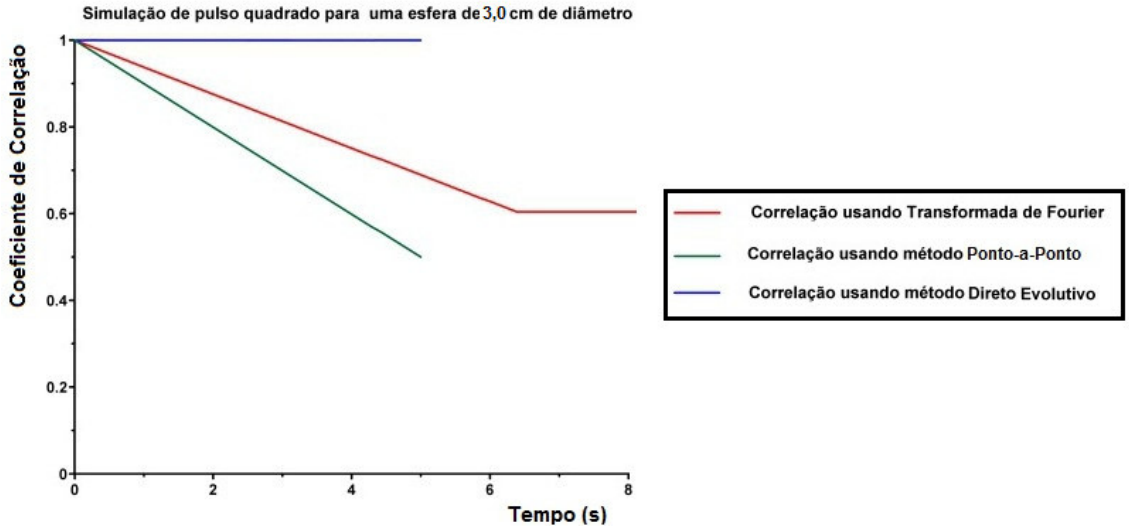


Figura 7.3 - Coeficiente de Correlação para pelota de minério possuindo 3,0 cm de diâmetro e distância entre os detectores de 10 cm.

7.1.2 - Correlator Modificado

Nessa nova configuração efetuou-se uma transformação de eixos para que os dados experimentais fossem corrigidos por uma translação de eixo, com a finalidade do valor inicial da contagem registrada ser igual a zero, e uma rotação de eixos para que o valor final da CPS também seja igual a zero, isto é: [53]

Correlator Corrigido:

Translação de eixos para que CPS (t= 0.Δt) = 0,0

Rotação de eixos para que CPS (t=N.Δt) = 0,0

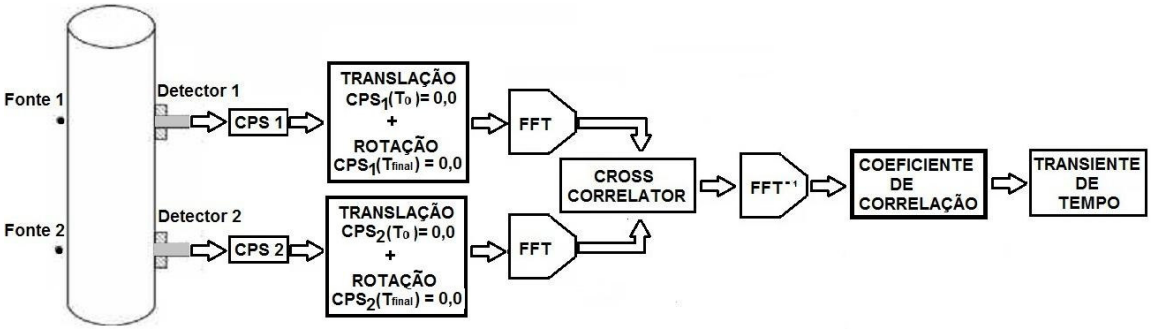


Figura 7.4 - Correlator modificado para de cálculo do transiente de tempo. [53]

Esse método (Figura 7.4) é uma alteração do método do correlator original, e tem o intuito de adaptar a metodologia para pulsos invertidos.

Para ilustrar o método do correlator modificado, foi novamente simulada a situação em que uma pelota esférica com 3,0 cm de diâmetro percorria o tubo com distância entre os dois detectores de 10 cm e intervalo de tempo entre os dois eventos igual a 0,28 s. O resultado do Coeficiente de Correlação é apresentado na Figura 7.5:

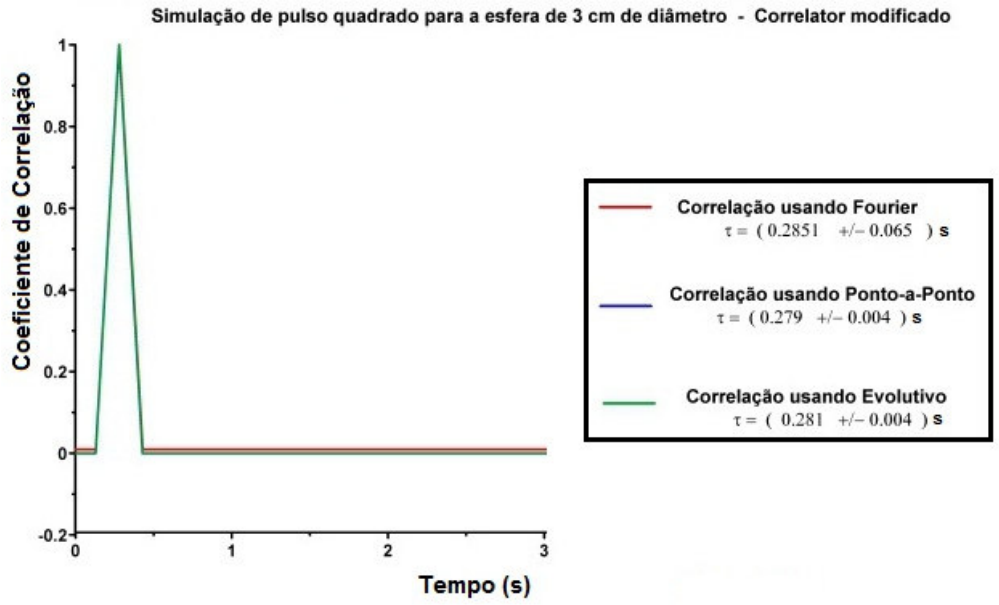


Figura 7.5 - Coeficiente de correlação para o correlator modificado utilizando pelota de minério com 3,0 cm de diâmetro e distância entre os detectores de 10 cm.

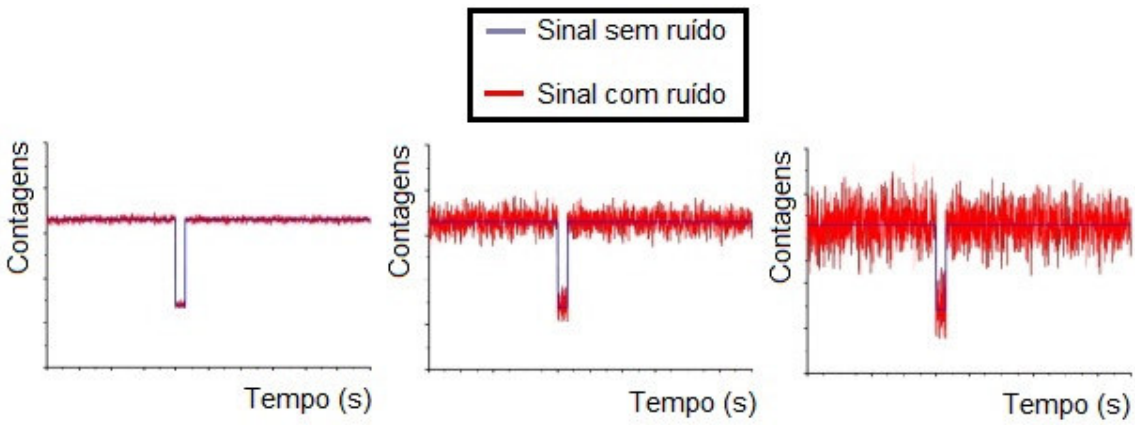
Como pôde ser observado na Figura 7.5, todas as curvas apresentam o comportamento típico para uma curva de Coeficiente de Correlação. Foram também calculados o valor do transiente do tempo e da incerteza associada . Em todos os três casos, os valores calculados foram iguais ao valor teórico de 0,28 s, mostrando que se pode usar qualquer um dos procedimentos para o cálculo do transiente de tempo, ou seja, o correlator modificado foi capaz de calcular o valor real do transiente de tempo entre os eventos. Ainda é possível observar que as curvas apresentam uma região com um pico muito bem definido, entre t = 0,1 s e t = 0,6 s, com o máximo da curva localizado próximo ao valor teórico de t = 0,28 s. Nessa região, podemos considerar a curva como uma distribuição estatística e calcula-se o primeiro e o segundo momento estatístico (Equações 5.14), bem como o valor do transiente de tempo e a incerteza associada. É necessário salientar que estes dados dos pulsos de entrada não apresentam interferência alguma de ruído, por isso os resultados para os três métodos

apresentam uma incerteza relativa igual a 1% (quando comparadas com o valor teórico).

7.1.3 - Interferência do Ruído Eletrônico na Correlação

Na prática não é possível realizar as medidas com detectores cintiladores sem a interferência de ruído (eletrônico ou radiação de fundo). O processo de decaimento radioativo é estatístico, logo a própria medida do sinal da fonte sofre a ação de uma variação estatística, e também existe uma possível interferência de ruídos associados a equipamentos elétricos e/ou eletrônicos como: bombas hidráulicas, antenas de recepção e transmissão de rádio, etc. Assim, é necessário que o processo de medida do transiente de tempo seja um processo preciso, mesmo para os casos em que a relação sinal/ruído é ruim. [54]

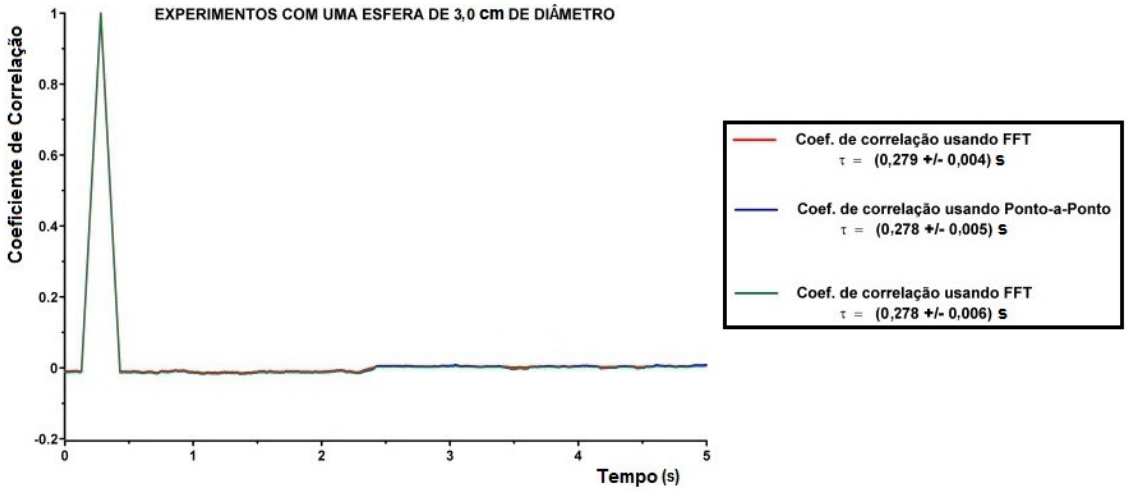
Para testarmos o correlator na presença de ruídos, simulou-se três casos com intensidades de ruído de 0,2%, 2,0% e 10,0%. Na Figura 7.6 são mostradas estas três condições, juntamente com o pulso original para o detector D1.



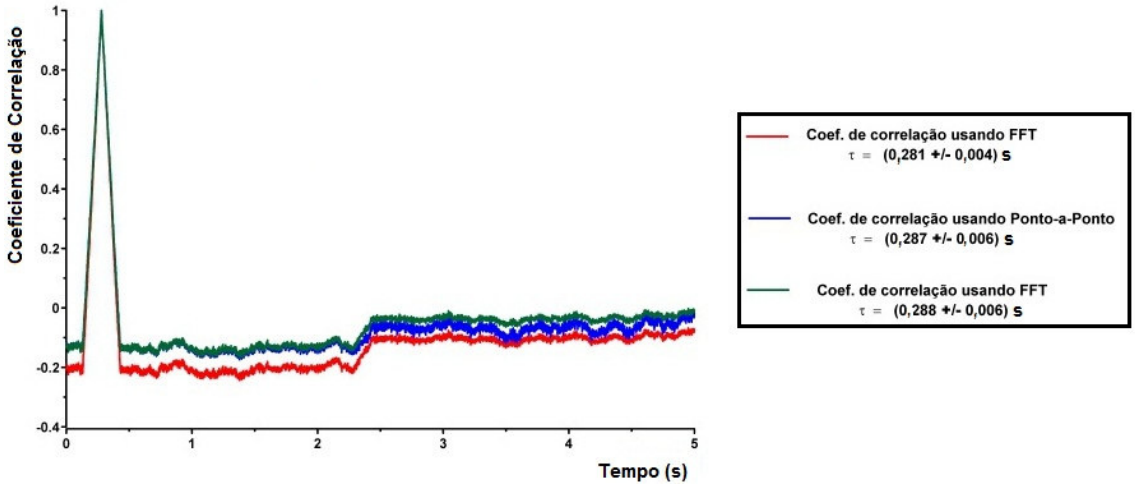
(a) (b) (c)

Figura 7.6 - Sinal de pulso quadrado com ruído eletrônico para: (a) 0,2% de ruído, (b) 2,0% de ruído e (c) 10,0 % de ruído.

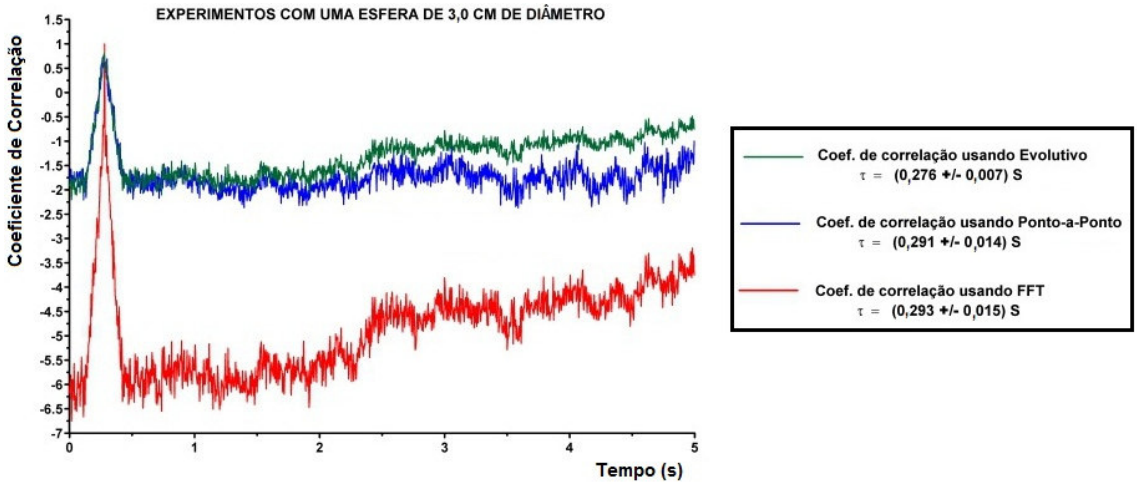
Como pode ser observado, a forma da curva não é alterada com a presença de ruído eletrônico. No entanto, conforme o ruído fica mais intenso a oscilação do sinal em torno de um valor central também se torna maior. Para cada um dos casos, o Coeficiente de Correlação foi calculado usando a Transformada de Fourier (Figura 7.7):



(a)



(b)



(c)

Figura 7.7 - (a) Sinal do Coeficiente de Correlação com 0,2% de ruído eletrônico; (b) Sinal do Coeficiente de Correlação com 2,0% de ruído eletrônico; (c) Sinal do Coeficiente de Correlação com 10,0% de ruído eletrônico.

Os gráficos demonstram que o método da Transformada de Fourier é o mais indicado para o cálculo do transiente de tempo. Nas três situações simuladas com ruídos de intensidades diferentes, o valor calculado mais preciso para o transiente de tempo foi obtido quando se utilizou a Transformada de Fourier. Estes resultados tornam-se mais evidentes quando o ruído é da ordem de 1 %, resultando num valor do transiente de tempo com uma incerteza relativa associada da ordem de 1,7%, comparada com 5% para os outros dois métodos.

7.2 - Determinação da Velocidade de Arraste de Pelotas de Minério

Em todos os testes realizados com os corpos de provas produzidos, as condições experimentais foram:

- Posição inicial de lançamento da pelota: localizada a 90 cm acima do centro de D1;
- Pelotas lançadas com velocidade inicial nula;
- As fontes de ^{241}Am têm atividade de $5{,}5 \times 10^{-4}$ mCi e $4{,}8 \times 10^{-4}$ mCi;
- Início da contagem do sistema de aquisição: 5 s antes do lançamento da pelota;
- Intervalo de tempo entre aquisições de 50 ms;
- Sinal registrado em D1 e D2, os quais estão a uma distância de 18 cm um do outro.

Também é necessário salientar que o movimento das pelotas no duto segue uma trajetória randômica, no centro ou próxima às bordas do duto e, dependendo da posição em que foram abandonados, os corpos de prova podem colidir uns com os outros, gerando ainda mais perturbação na trajetória de queda. Este movimento é bem próximo ao que ocorre num mineroduto real, entretanto difere do postulado na modelagem matemática.

Em todos os testes o nível inicial da água no duto foi mantido constante, sendo preenchido a cada novo experimento após a abertura da segunda válvula de controle.

7.2.1 - Teste Experimental com P1: Pelota Esférica de Cimento de 3,0 cm

Foram reproduzidos três experimentos diferentes para este caso e os resultados estão mostrados na Tabela 7.1.

Tabela 7.1 - Experimentos com a esfera de cimento de 3 cm de diâmetro**.**

Experimento	**(τ ± Δτ) s**	**(v ± Δv) cm/s**
1	0.389 ± 0.02	46.27 ± 3.13
2	0.392 ± 0.04	45.92 ± 5.34
3	0.387 ± 0.04	46.51 ± 5.46
MÉDIA	0.389 ± 0.06	46.23 ± 8.25

Os dados da Tabela 7.1 mostram que os valores para o transiente de tempo calculados são bem próximos, apresentando um valor médio igual a 0,389 ± 0,06 s. Isto mostra a reprodutibilidade dos resultados.

A Figura 7.8 apresenta o registro do sinal nos detectores D1 e D2 para o caso da pelota de cimento em queda livre no duto. A passagem da pelota pelos detectores é evidenciada pelo registro dos dois picos entre t = 18 s e t = 19 s. Como a fonte do sistema D2 tem atividade inferior, registra um pico de menor intensidade. É evidente a contribuição do ruído eletrônico no sinal registrado, mas conforme estudado no Item 7.1.3, esta contribuição é minimizada no método adotado para o cálculo do Coeficiente de Correlação.

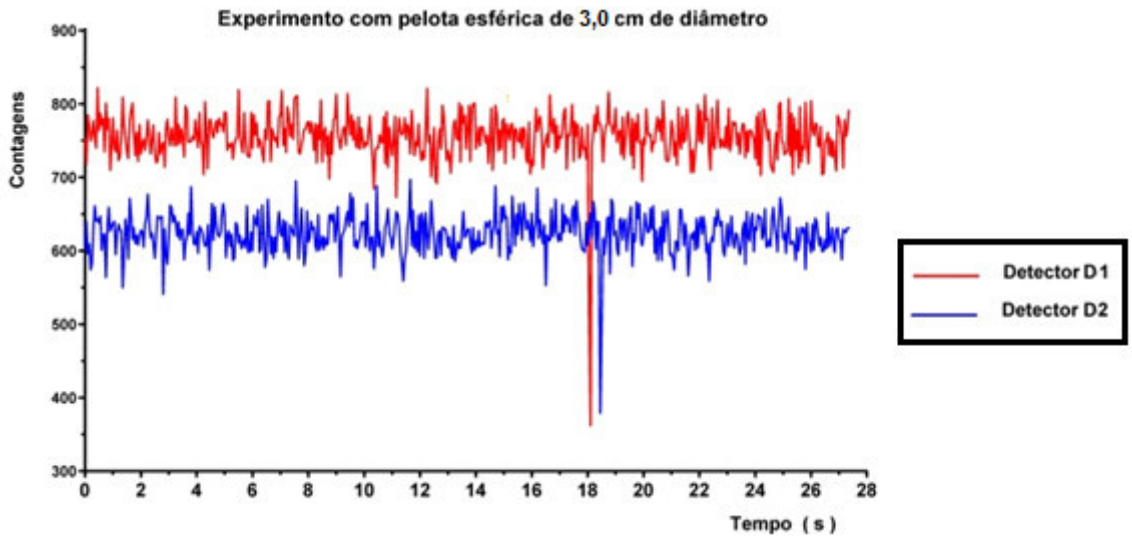


Figura 7.8 - Registro da passagem da pelota de cimento de 3,0 cm de diâmetro na região compreendida entre D1 e D2.

Na Figura 7.9 está traçada a curva para o Coeficiente de Correlação entre os sinais de D1 e D2, sendo evidente o pico que corresponde ao sinal do Transiente de Tempo entre t = 0,1 s e t = 0,8 s, que resulta um valor para τ = 0,389s.

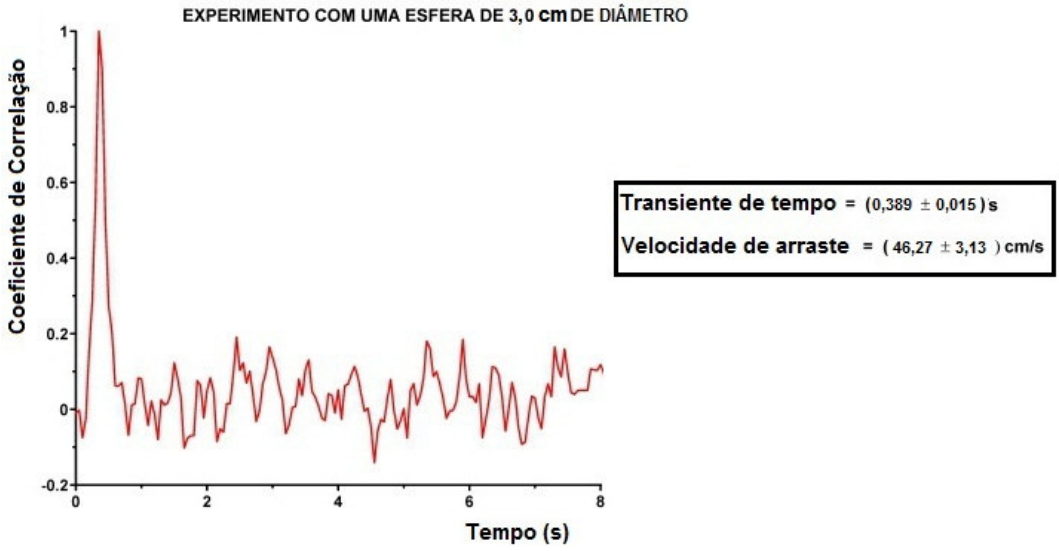


Figura 7.9 - Coeficiente de Correlação para a pelota de cimento de 3,0 cm de diâmetro.

Comparando o valor do transiente medido e apresentado na Figura 7.9 com os dados da Tabela 7.1 é possível verificar a validade da aplicação dos métodos da Transformada de Fourier para o cálculo do transiente de tempo entre D1 e D2.

7.2.2 - Teste Experimental com P2: 7 Pelotas Esféricas de 2,0 cm

Diferente do caso anterior em que se usou uma única pelota, neste teste foram utilizadas 7 pelotas, lançadas simultaneamente, e o resultado dos sinais dos detectores D1 e D2 podem ser visualizados na Figura 7.10.

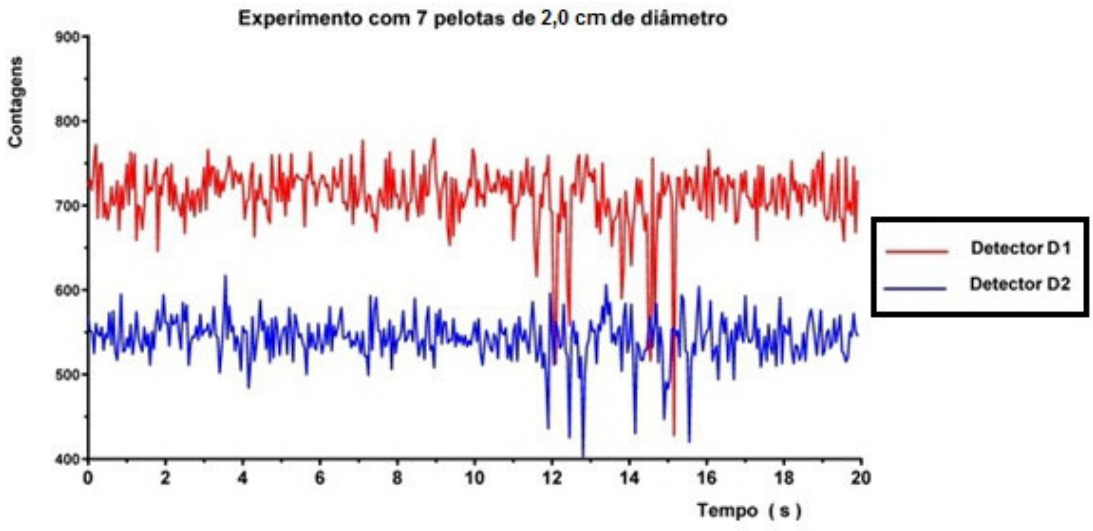


Figura 7.10 - Registro da passagem entre D1 e D2 de 7 pelotas com 2,0 cm de diâmetro.

Quando abandonadas no ponto de lançamento, cada uma das pelotas descreve uma trajetória randômica, se deslocando por toda a área útil do duto, inclusive colidindo uma com a outra diversas vezes, por isso a Figura 7.10 apresenta uma série de picos de intensidades diferentes (para cada um dos detectores), pois cada sinal desse tipo corresponde ao registro de uma ou mais pelotas em posições distintas. Como ilustrado na Figura 7.10 existem dois “pacotes de pelotas”, o primeiro entre t = 11,0 s e t = 13,0 s e o segundo entre t = 14,0 s e t = 16,0 s. Esta situação foi provocada pelo movimento natural das pelotas no interior do duto.

Para este caso, a curva do Coeficiente de Correlação mostra duas regiões com pico, a primeira entre t = 17,0 s e t = 18,5 s, apresentando um valor máximo em torno de t = 17,81 s, e a segunda entre t = 22,5 s e t = 24,0 s, com dois picos muito próximos, um em t = 22,91 s, e o outro máximo da curva em t = 23,16 s, conforme pode ser visualizado na Figura 7.11.

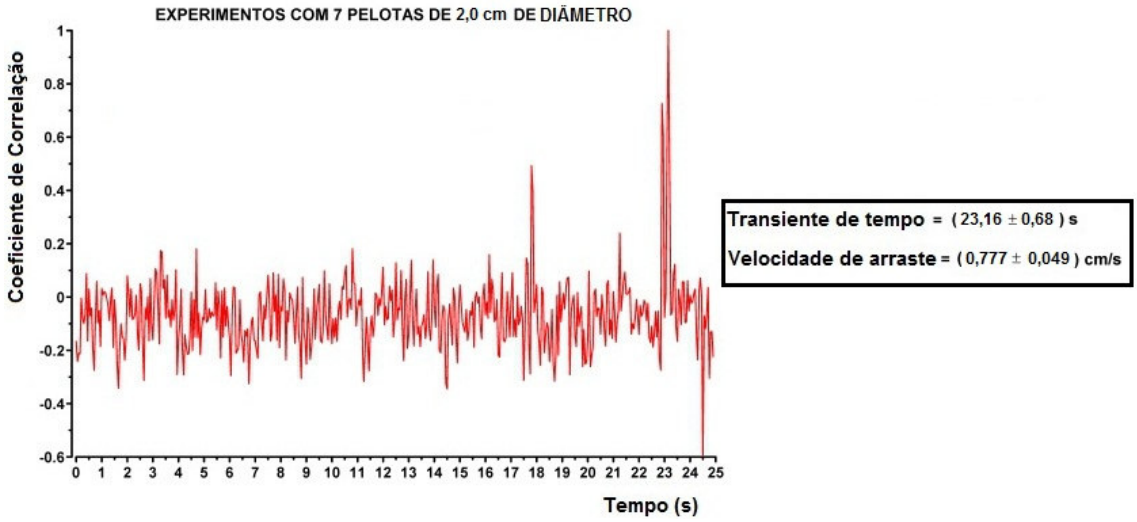


Figura 7.11 - Coeficiente de Correlação para 7 pelotas P2.

Esta estrutura composta por picos de valores diferentes é resultado da correlação que ocorre entre os sinais registrados para as pelotas independentes e, o máximo corresponde ao valor da correlação entre o “pacote de 7 pelotas” registrado entre D1 e D2, ou seja, o máximo da curva do Coeficiente de Correlação (valor normalizado de 1,0) corresponde ao transiente de tempo entre os dois detectores devido ao conjunto de todas as pelotas, enquanto os demais picos correspondem a correlações existentes entre sinais das pelotas individuais.

7.2.3 - Teste Experimental com P3: 12 Pelotas Esféricas de 1,0 cm de Diâmetro

Nesta simulação foram consideras 12 pelotas esféricas com diâmetro de 1,0 cm, todas abandonadas conjuntamente em queda livre. Ambos os detectores cintiladores possuíam colimadores acoplados de forma que a face lateral do cristal estava totalmente blindada com chumbo, e a face dianteira apresentava um obturador de 2,5 cm de diâmetro e 3,0 cm de espessura. Nesta configuração geométrica, toda a área livre do duto fica exposta ao detector. Assim, mesmo com pelotas de 1,0 cm de diâmetro se deslocando pela região sensível do detector, foi possível registrar a quantidade de radiação gama espalhada, como mostrado na Figura 7.12, nesse caso entre t = 24,0 s e t = 30,0 s.

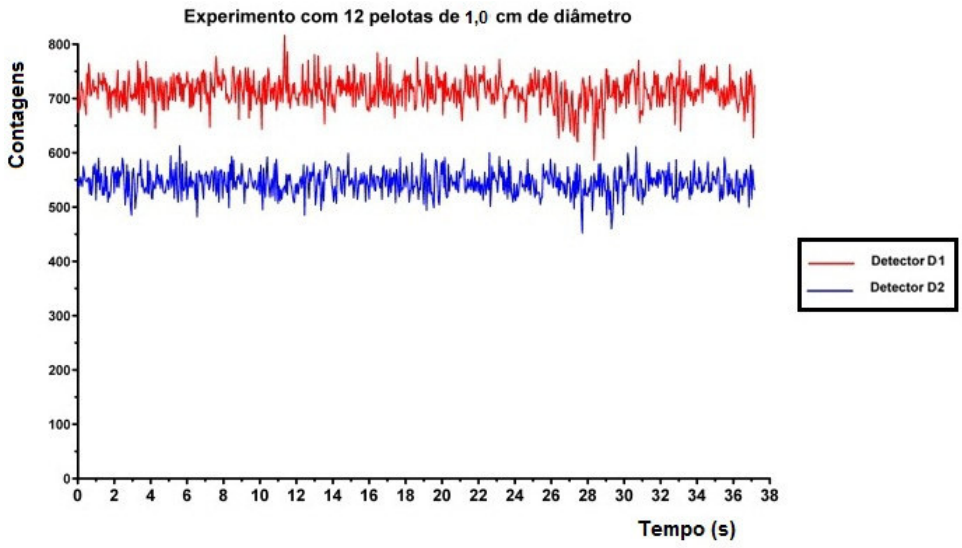


Figura 7.12 - Registro da passagem de 12 pelotas P3 através entre os detectores D1 e D2.

Por meio da análise do gráfico acima se constata que a intensidade dos sinais do registro das pelotas é muito baixa, ou seja, a relação sinal/ruído é muito ruim. No entanto, na área nuclear consideramos que um sinal pode ser discriminado do ruído quando o seu valor é no mínimo igual a 2,5x o valor do sinal da radiação de fundo somado ao do ruído eletrônico. [32] Por sua vez ao comparar os valores registrados para esse experimento verifica-se que essa condição não foi satisfeita.

Na Figura 7.13 é apresentado o Coeficiente de Correlação, onde não se pode identificar nenhum ponto de máximo, contrastando com as situações anteriores. Logo neste caso não se pode determinar o transiente de tempo para o movimento das

pelotas, mesmo que fosse utilizado o cálculo dos momentos estatísticos.

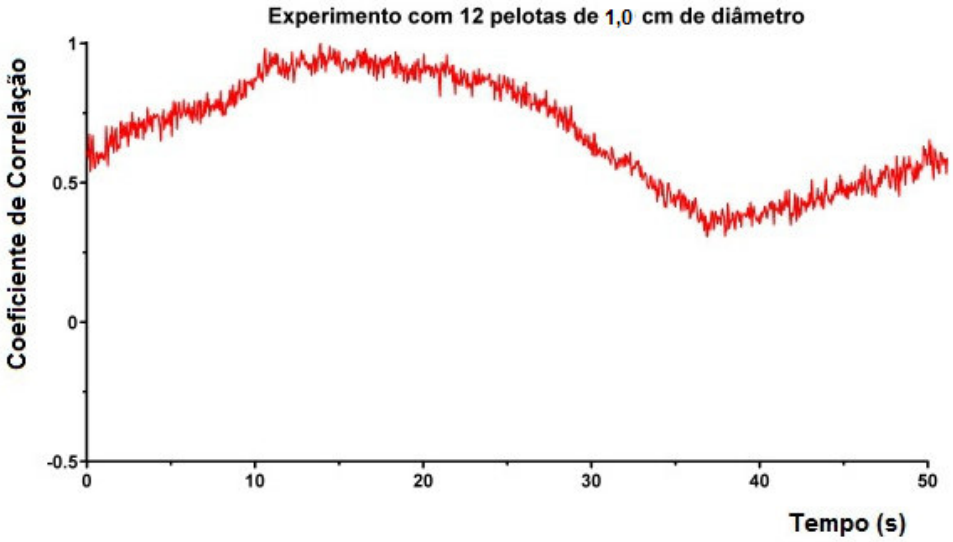


Figura 7.13 - Coeficiente de Correlação para 12 pelotas P3.

Para que as medidas experimentais pudessem ser realizadas dentro da precisão dos casos anteriores, ter-se-ia que usar duas fontes com atividades mais elevadas. Dessa forma, haveria melhora na relação sinal/ruído.

7.2.4 - Teste Experimental com P4: 6 Pelotas Cúbicas de 2,0 cm de Aresta

Para analisar o movimento de pelotas diferentes, foram utilizadas 6 pelotas com formato cúbico possuindo 2,0 cm de aresta, liberadas simultaneamente no interior do duto. Estes corpos de prova foram construídos com densidade bem próxima à da água para que pudessem se deslocar com velocidade mais lenta.

Um problema verificado durante a realização do teste foi que algumas pelotas se deslocaram unidas, ocupando quase a totalidade da secção transversal do duto. Esse fato pode ser verificado na Figura 7.14, para o sinal registrado em t = 39,5 s em D1 e t = 40,3 s em D2, pois apresenta a menor intensidade em relação aos outros sinais observados (aproximadamente de valor constante), correspondendo a passagem de pelotas individualmente. Portanto o conjunto de picos observados entre t = 40,4 s e t = 44,0 s mostra todo o deslocamento das demais pelotas pelo duto.

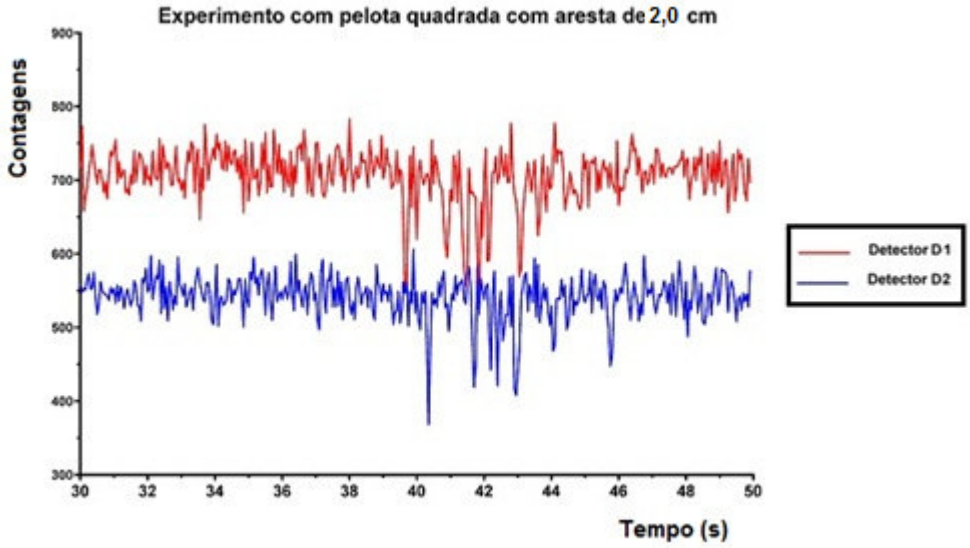


Figura 7.14 - Registro da passagem entre D1 e D2 de 6 pelotas P5.

Na Figura 7.15 está traçado o gráfico do Coeficiente de Correlação, onde se pode observar que mesmo havendo uma boa relação sinal/ruído, a intensidade dos sinais registrados mostra que a curva tem um comportamento diferente, em que a média para a linha de base tem um valor alto, em torno de 0,5 (50% do valor do ponto de máximo) entre t = 5,0 s e t = 10,0 s, evidenciando certa dificuldade em medir com precisão o valor do transiente de tempo.

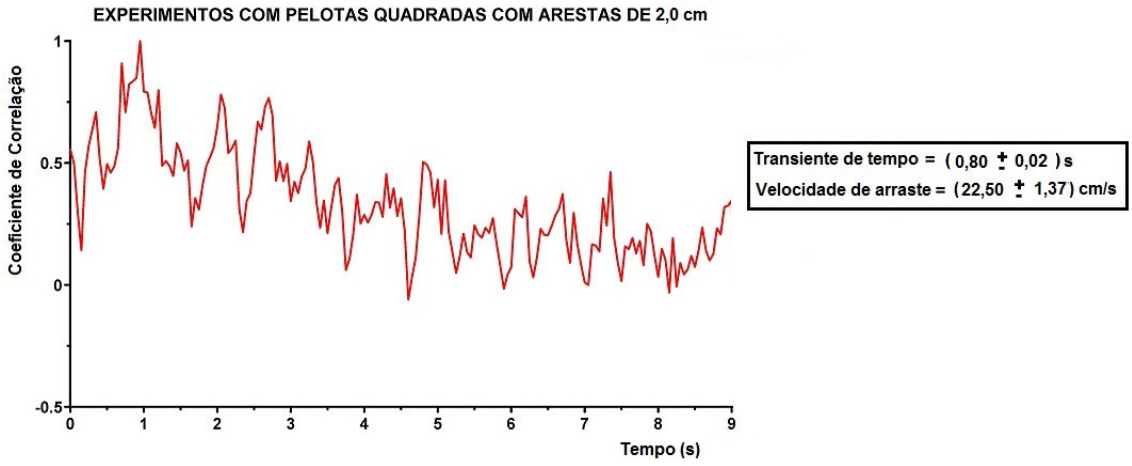


Figura 7.15 - Coeficiente de Correlação para 6 pelotas P5.

Neste teste ocorreu um deslocamento lento devido às pelotas utilizadas possuírem densidade próxima à da água. Dessa forma no espaço entre D1 e D2, a configuração de todo o conjunto de corpos de prova não se manteve constante ou até

mesmo foi identificada a formação de “pacotes”. Este fato é evidenciado pela estrutura dos picos da curva do Coeficiente de Correlação (Figura 7.15) por meio do ponto de máximo para t = 0,94 s, contudo nota-se que o gráfico apresenta outros picos com intensidade da ordem de 0,75 entre t = 1,4 s e t = 2,3 s.

7.2.5 - Teste Experimental Simulação de Leito Móvel com 9 Pelotas P2 e 2000 Esferas de Acrílico

Uma das situações que ocorre no interior do mineroduto é a formação de um leito móvel, onde as partículas que decantam se movem com velocidade mais lenta na borda do tubo e as demais se deslocam com velocidade superior. Simulamos esse cenário liberando um conjunto formado por 9 pelotas P2 e 2000 esferas de acrílico com 0,7 cm de diâmetro.

Os resultados dos sinais gerados pelos detectores são apresentados na Figura 7.16, onde os picos presentes no intervalo de tempo compreendido entre t = 25,0 s e t = 33,0 s demonstram o registro da passagem das pelotas P2. No entanto, a movimentação das 2000 esferas de acrílico não é evidenciada com uma estrutura típica na curva, pois o Coeficiente de Atenuação do acrílico (polimetil-metacrilato PMMA) é próximo ao da água (para a energia do fóton gama de 59,6 keV do ^{241}Am), sendo assim a absorção/espalhamento dos fótons gama nos dois meios é muito próxima.

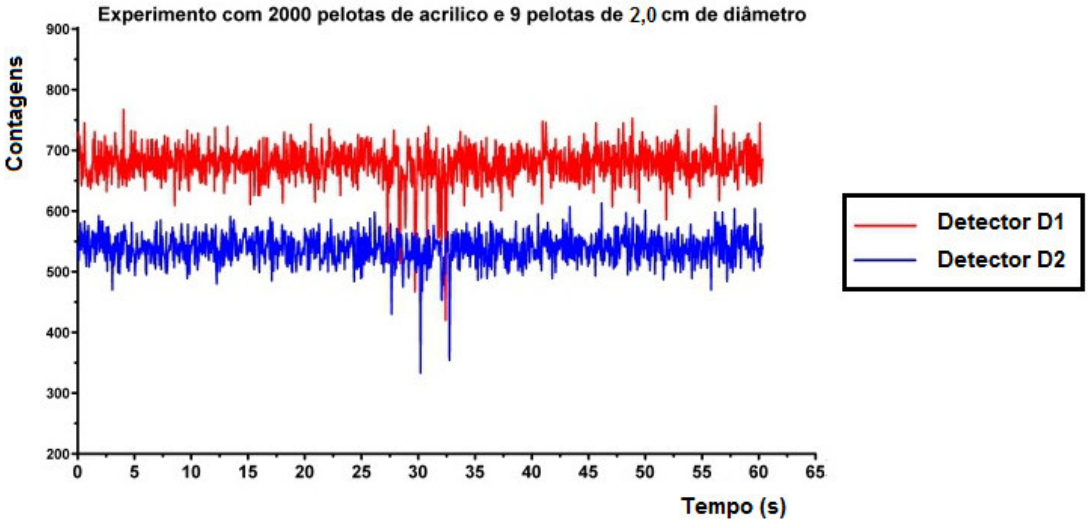


Figura 7.16 - Registro da passagem do leito móvel composto por esferas de acrílico e pelotas P2 entre D1 e D2.

As pelotas P2 também não se movimentaram como um conjunto único devido à presença de um grande número de esferas de acrílico, fazendo com que as pelotas se deslocassem formando três grupos distintos, devido à presença de apenas três picos

com intensidades mais baixas (em t = 27,5 s, t = 30,0 s e t = 32,5 s), como se nota no gráfico apresentado na Figura 7.16.

Como as esferas de acrílico no leito móvel não se deslocam de maneira ordenada (semelhante a uma duna se movimentando no interior do duto), o sinal registrado pelos detectores tem a forma de um ruído. No entanto a passagem das esferas não pode ser visualizada no gráfico apresentado na Figura 7.16, pois a intensidade da fonte era baixa para ser capaz de diferenciar esses sólidos da água (pois o Coeficiente de Atenuação do acrílico era próximo ao da água, como já dito).

Esta movimentação das pelotas e da duna fica mais evidente quando se calcula o Coeficiente de Correlação entre D1 e D2 (Figura 7.17). A curva apresenta um máximo intenso para t = 0,963 s, correspondendo ao transiente de tempo das pelotas P2. Entre t = 0,94 s e t = 4,63 s aparece o que se denomina “estrutura de banda”, que corresponde à movimentação lenta de porções da duna (ou leito móvel).

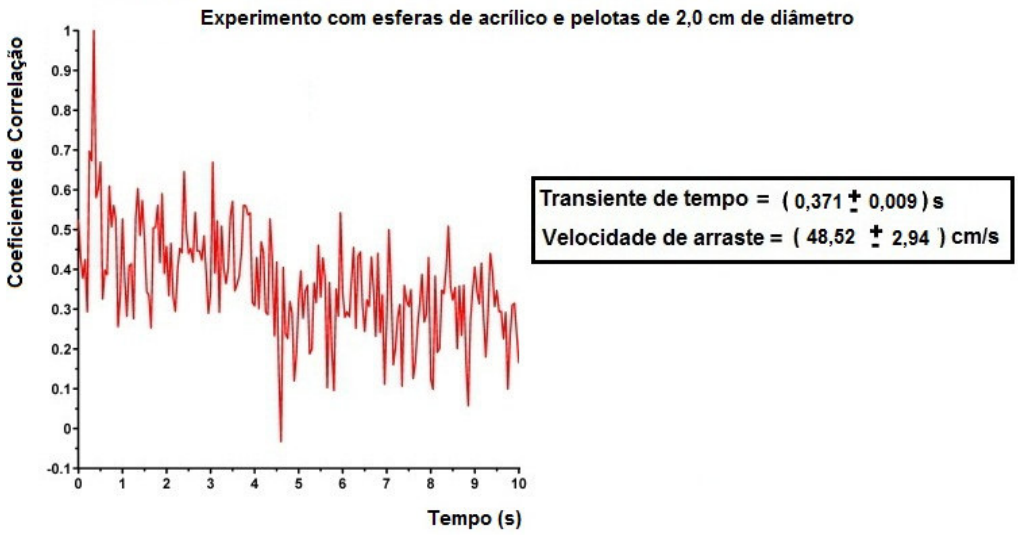


Figura 7.17 - Coeficiente de Correlação para leito móvel composto por esferas de acrílico e pelotas P2.

8 - CONCLUSÕES

Os resultados provaram que a principal proposta do trabalho de pesquisa foi atingida, mesmo persistindo a dificuldade de se medir a velocidade com que as pelotas se deslocam no interior do mineroduto, pois se trata de um sistema de escoamento bifásico (sólido/liquido) com densidade variável e dependente do perfil do fluxo.

A associação da correlação entre os sinais registrados pelos dois detectores e a medida da função Cross-Correlation permitiu que fosse calculada a velocidade de arraste de pelotas de minério em diferentes situações.

Conforme discutido, a técnica da medida de função Cross-Correlation empregando Transformada de Fourier foi a mais indicada, pois permitiu obter resultados com incertezas menores (aproximadamente 1%) em comparação com a do método direto (aproximadamente 5%). Por outro lado, mesmo sendo necessário um tempo de processamento maior (devido ao grande número de operações computacionais), a técnica que utiliza Transformada de Fourier não ser torna desfavorável, pois a velocidade dos atuais processadores digitais é compatível com a quantidade de dados coletados.

Ainda, como pôde ser observado na prática, não foi possível realizar medidas com detectores cintiladores sem interferências externas. No entanto a forma da curva não se alterou devido à presença de ruído.

Por sua vez, o objetivo secundário do projeto que era a construção de uma unidade de teste (estático) de um mineroduto foi atingido. Atualmente esta unidade encontra-se em funcionamento no Laboratório de Traçadores Radioativos do Instituto de Engenharia Nuclear (IEN) e será utilizada em estudos posteriores.

Por fim, uma dificuldade constatada na execução do trabalho foi a medida da velocidade de pelotas de pequenas dimensões ou que se deslocavam rapidamente. Por essa razão pode ser sugerido como objeto de trabalho futuro, a otimização da distância entre os detectores, pois este parâmetro leva em conta o tipo (dimensão, densidade) das pelotas que irão ser monitoradas. Outro possível estudo é provar que a velocidade da fase liquida não interfere na medida da velocidade das pelotas.

9 - REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

[1] ELMOR, L. F., ***Modelo Operacional de Descarga de Minério de Ferro Através de Simulação de Eventos Discretos****,* Engº de Produção, Universidade Federal de Juiz de Fora , Juiz De Fora , Minas Gerais, Brasil, 2011.

[2] BRANDÃO, L. E. B., SALGADO, C. M., SICILIANO, U. C. C. S., **"NUCLEAR TECHNIQUES AND CROSS-CORRELATION METHODS FOR SPECTRAL ANALYSIS IN TWO-PHASE FLOW MEASUREMENTS IN MINERAL PIPELINES"**, *International Nuclear Atlantic Conference (INAC),* 978-85-99141-05-2, Recife, Pernambuco, Brasil, 24-29 November 2013.

[3] **Informações e Análises da Economia Mineral Brasileira***,* 7ª Edição, Instituto Brasileiro de Mineração (IBRAM), 2012.

[4] FERREIRA, G. E., **A Competitividade da Mineração de Ferro no Brasil***,* In: Série Estudos & Documentos, ISSN-0103-6319, Centro de Tecnologia Mineral (CETEM)*,* Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, Brasil, 2001.

[5] RIBEIRO, P.C.C., FERREIRA, K. A., "**Logística e Transportes: Uma Discussão Sobre os Modais de Transporte e o Panorama Brasileiro"**, *XXII Encontro Nacional de Engenharia de Produção (ENEGEP),* Curitiba, Paraná, Brasil, 23-25 de Outubro de 2002.

[6] Disponível em:
<http//upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/3/3f/Pipeline-componentes.jpg>
Acesso em: 3 Jul. 2014.

[7] Engenharia Compartilhada, ***Transporte aerovriaiário, aquaviário e dutoviário*****,** 2013.

[8] NAZÁRIO, P., **"Intermodalidade: Importância para a Logística e Estágio Atual no Brasil"**, *XIII Simpósio de Administração da Produção, Logística e Operações Internacionais (SIMPOI), São Paulo, São Paulo, Brasil,* 25-27 de Agosto de 2010.

[9] COELHO, C. F., MORALES, G., **"Comparação de Modais de Transporte para Escoamento de Minério: Indicadores de Sustentabilidade**"*, VII Congresso Nacional e Excelência em Gestão*, 1984-9354, Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 8-9 de Junho de 2012.

[10] Disponível em:
<http://exame.abril.com.br/arquivos/img_958/grandes-numeros1.jpg>
Acesso em: 3 Jul. 2014.

[11] Disponível em:
<http://4.bp.blogspot.com/-0iDDqgqb8-E/UzMLBEgD5hI/AAAAAAAAYIY/9PG1JLwPmf0/s1600/Movimenta%C3%A7%C3%A3o+de+cargas+nos+portos+brasileiros+em+2013+-+TUP+-+privados.jpg>
Acesso em: 3 Jul. 2014.

[12] Disponível em:
(a) <http://professorjamesonnig.files.wordpress.com/2012/09/porto-do-itaqui.jpeg>
Acesso em: 3 Jul. 2014.

(b) <http://www.informativodosportos.com.br/wp-content/uploads/2013/05/noticia_18495.jpg>
Acesso em: 3 Jul. 2014.

[13] Disponível em:
(a) <http://2.bp.blogspot.com/-8KjsjHA-GhE/TyMt5Kn3D5I/AAAAAAAABA4/AVda5AK-Dck/s400/mapa+br+101.jpg>
Acesso em: 3 Jul. 2014.

(b) <http://www.luizberto.com/wp-content/2013/07/4-4.-BR-101-Domingo-13-horas-Buraqueira.jpg>
Acesso em: 3 Jul. 2014.

[14] Disponível em:
<http://ri.all-logistica.com/all/web/images/Mapa_Malha_Ferroviaria_PT.jpg>
Acesso em: 3 Jul. 2014.

[15] VAZ, A. V., OLIVEIRA, K. N. D., DAMASCENO, P. E. G., **O Modal Dutoviário: Análise da Importância e Considerações Sobre Suas Principais Características**, Programa de Mestrado em Engenharia de Transportes, Universidade Federal do Ceará, Brasil, 2005.

[16] Disponível em:
<http://internationalforeigntrade.com/image/image/NOTICIAS%20WELL/Sem%20t%C3%A Dtulo%20290.jpg>
Acesso em: 11 Jul. 2014.

[17] Disponível em:
<http://s3.amazonaws.com/magoo/ABAAAAlhkAL-0.jpg>
Acesso em: 11 Jul. 2014.

[18] Disponível em:
<http://3.bp.blogspot.com/_QcPSRUCyrgg/RgMvrnLXcRI/AAAAAAAAAck/GHAn0TJKshU/s400/laminar.gif>
Acesso em: 11 Jul. 2014.

[19] VIDAL, A. M., **Estudo de Bombeamento de Partículas Grossas**, Curso de Especialização em Engenharia de Recursos Minerais, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, Minas Gerais, Brasil, 2011.

[20] SOLDERA, P. E. S., ***Perda de Carga Provocada por Escoamento Heterogêneo em Condutos Horizontais***, M.Sc. Dissertação, Faculdade de Engenharia Civil, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, São Paulo, Brasil, 2001.

[21] Disponível em:
(a) <http://www.canaris-com.com.br/wp-content/uploads/2013/05/89731-Minerodu to1.jpg>
Acesso em: 11 Jul. 2014.

(b) <http://www.defatoonline.com.br/userfiles/images/2%28119%29.jpg>
Acesso em: 11 Jul. 2014.

(c) <http://i.ytimg.com/vi/Lj7XQFS-C44/0.jpg>
Acesso em: 11 Jul. 2014.

(d) <http://mw2.google.com/mw-panoramio/photos/medium/11610155.jpg>
Acesso em: 11 Jul. 2014.

(e) <http://www.constran.com.br/images/contratos/49_20130626013006_minerod uto-4-.jpg>
Acesso em: 11 Jul. 2014.

(f) <http://3.bp.blogspot.com/-DBf1GGa8EI0/TjazyvUsLwI/AAAAAAAAAR8/qM7Jx zGCj84/s1600/ Camargo.JPG>
Acesso em: 11 Jul. 2014.

[22] Disponível em:
<http://controleinstrumentacao.com.br/arquivo/ed_116/img/002.jpg>
Acesso em: 11 Jul. 2014.

[23] Disponível em:
<http://3.bp.blogspot.com/_3kHTLDS6j1I/TFDDrCno2AI/AAAAAAAAAtM/tm5MqR9WrSE/s1600/rio+muriae.jpg>
Acesso em: 11 Jul. 2014.

[24] Disponível em:
<http://www.premobras.com.br/imagem/produtos/1/thumbnails/DSC00460_640x0_w_124cc69ee62e04e21921e448dd28a62e.jpg>
Acesso em: 11 Jul. 2014.

[25] ***Estudo de Impacto Ambiental: Instalação e Operação de Mineroduto***, In: MMX MINAS - RIO MINERAÇÃO E LOGÍSTICA LTDA, Volume I, Minas Gerais e Rio De Janeiro, Brasil, 2006.

[26] ***Isto é Dinheiro - NEGÓCIOS***, Nº Edição: 754, 2012.

[27] **Anuário Estatístico dos Transportes Terrestres (AETT)**, 2007.

[28] Disponível em:
(a) <http://revistadoispontos.com/wp-content/uploads/2013/02/agu1.jpg>
Acesso em: 11 Jul. 2014.

(b) <http://petromaxx.com/portal/wp-content/uploads/2011/09/Mineroduto.jpg>
Acesso em: 17 Ago. 2014.

[29] Disponível em:
<http://www.jornaldeuberaba.com.br/zdata/arquivos/Maio_2014/16/A8%20%281%29.jpg>
Acesso em: 11 Jul. 2014.

[30] Disponível em:
(a) <http://i211.photobucket.com/albums/bb207/raphadudao/01-12-09008.jpg>
Acesso em: 11 Jul. 2014.

(b)<http://i211.photobucket.com/albums/bb207/raphadudao/01-12-09017.jpg>
Acesso em: 11 Jul. 2014.

[31] Disponível em:
<http://www.ctb.com.pt/wp-content/uploads/2011/03/Fig-50---Espectro-da-ondas-electromagneticas_MC.jpg>
Acesso em: 5 Jun. 2014.

[32] TAUHATA, L., SALATI, I. P. A., PRINZIO, R. D., PRINZIO, A. R. D., SALATI, I. P. A., ***Radioproteção e Dosimetria: Fundamentos****,* 5ª Revisão, Rio de Janeiro, Comissão Nacional de Energia Nuclear, 2003.

[33] KNAVE, B., "Radiaciones no Ionizantes". In: Ministerio de Trabajo y Asuntos Sociales, ***Enciclopedia de Salud y Seguridad en el Trabajo,*** 3 ed., chapter 49, España, 1998.

[34] ASTETE, M. W., GIAMPAOLI, E., ZIDAN, L. N., "Radiações não Ionizantes". In: Fundacentro, ***Riscos Físicos,*** 1 ed., capítulo 3, Brasil, 1994.

[35] YOSHIMURA, E. M., "Física das Radiações: Interação da Radiação com a Matéria", **Revista Brasileira de Física Médica**, v. 3, n. 1, pp. 57-67, 2009.

[36] Disponível em:
<http://rle.dainf.ct.utfpr.edu.br/hipermidia/images/raiosx/fig10.png>
Acesso em: 5 Jun. 2014.

[37] Disponível em:
<http://files.efeitofotoeletricoecompton.webnode.com.br/200000016-20cec21451/EF%204.jpg>
Acesso em: 5 Jun. 2014.

[38] Disponível em:
<http://rle.dainf.ct.utfpr.edu.br/hipermidia/images/raiosx/fig12.png>
Acesso em: 5 Jun. 2014.

[39] Disponível em:
<http://rle.dainf.ct.utfpr.edu.br/hipermidia/images/raiosx/fig13.png>
Acesso em: 5 Jun. 2014.

[40] Disponível em:
<http://rle.dainf.ct.utfpr.edu.br/hipermidia/images/radiotera/fig4.png>
Acesso em: 5 Jun. 2014.

[41] Disponível em:
<http://images.slideplayer.com.br/2/359057/slides/slide_18.jpg>
Acesso em: 5 Jun. 2014.

[42] COSTA, P. R., **Interação da Radiação Gama com a Matéria.** 1 ed. São Paulo, Universidade de São Paulo, 2010.

[43] Disponível em:
<http://rabfis15.uco.es/ermuna.net/tutorial/detectores/det_centello.gif>
Acesso em: 5 Jun. 2014.

[44] PREKEGES, J., "Scintillation Detectors", In: Jones & Bartlett Publishers, ***Nuclear Medicine Instrumetation***, 2 ed., chapter 2, 2013.

[45] Disponível em:
<http://bibliotecadigital.ilce.edu.mx/sites/ciencia/volumen1/ciencia2/37/imgs/fig103.gif>
Acesso em: 5 Jun. 2014.

[46] Disponível em:
<http://images.slideplayer.com.br/1/291064/slides/slide_9.jpg>
Acesso em: 5 Jun. 2014.

[47] BALLESTER, F., ***"Espectroscopía con un Detector NaI (Tl)"***, 1 ed., Espanha, Universidad de Valencia, 2005.

[48] PETRYKA, L., OSZAJEC, J., "The Cross-Correlation Method of Solid Particle Velocity Measurements in Industry", ***The International Journal of Radiation Applications and Instrumentation,*** vol. 7, ISSN 0969-8086, pp. 323-333, 1993.

[49] SEN, S., DAS, P. K., DUTTA, P. K., MAITY, B., CHAUDHURI, S., MANDAL, C., ROY, S. K., "PC-Based Gas-Solids Two-Phase Mass Flowmeter for Pneumatically Conveying Systems", ***ELSEVIER,*** vol. 11, 10.1016/S0955-5986(00)00020-0 , pp. 205-212, 2000.

[50] JUNG, S-H., KIM, J-S., KIM, J-B., KWON, T-Y., “Applied Radiation and Isotopes Flow-Rate Measurements of a Dual-Phase Pipe Flow by Cross-Correlation Technique of Transmitted Radiation Signals”, ***Applied Radiation and Isotopes***, vol. 67, ISSN 0969-8043, pp. 1254-1258, 2009.

[51] BECK, M. S., CALVERT, G., HOBSON, J. H., LEE, K. T., MENDIES, P. J., “Total Volume and Component Flow Measurement in Industrial Slurries and Suspensions Using Correlation Tecniques”. In: MARCEL DEKKER, INC, ***Encyclopedia of Chemical Processing and Design,*** 1ed., Vol. 51, New York, United States of America,1995.

[52] GYSLING, D. L., ***Method and Apparatus for Detecting and Characterizing Particles in a Multiphase Fluid,*** United States Patent, 7.657.392 B2, Feb. 2, 2010.

[53] PUERTAS, E. J. A., ***Medição de Vazão Usando Radiação e a Técnica de “Cross-Correlation”***, M.Sc dissertação, COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, Brasil, 2014.

[54] MICHAELIS, W., FANGER, H., THE, H. L., ***Method and Apparatus for the Gamma Transmission Analysis of Multicomponent Mixtures in the Presence of Coarse Grained Components***, United States Patent, 4.539.649, Sep. 3, 1985.

10 - GLOSSÁRIO

Lavra
Conjunto de ações executadas para a extração de metais.

Pelota
Aglomerados de minério de ferro produzidos a partir de minerais de baixo teor.

Polpa
Mistura bifásica (sólido/líquido) composta por água e minério.

Purga
Produto indesejável, eliminado a partir da injeção de líquido (geralmente água) sob pressão no interior de tubos ou cavidades.

PVC
Abreviação dada a um tipo de material polimérico (cloreto de polivinila).