

# MONITORAMENTO EM UNIDADES DE HYDROTRANSPORT DE MINÉRIO USANDO ESPALHAMENTO GAMA E TÉCNICA DE “CROSS-CORRELATION”\*

*Umberto Cassará de Castellammare Scott Siciliano<sup>1</sup>*

## Resumo

A proposta desta pesquisa foi desenvolver uma metodologia que empregasse radiação gama e a técnica de “Cross-Correlation” para medir a velocidade das pelotas de minério no duto. Uma unidade experimental foi projetada e construída para realizar simulações de fluxos de duas fases, usando um medidor de fluxo, instalado externamente ao tubo, consistindo em dois sistemas independentes, cada um composto por uma fonte <sup>241</sup>Am de radiação gama (59,62 keV de energia) e um detector cintilador NaI (1 x 1 "). Estes sistemas estavam localizados no mesmo plano vertical e separados por uma distância de cerca de 18,0 cm. Como Pelotas, foram produzidos corpos de prova de composição distinta a fim de obter um espectro de densidades para verificar a validade da metodologia. Os resultados mostraram que o uso da densitometria gama associado com a medição do coeficiente de "Cross-Correlation" permitiu calcular o tempo transiente entre dois sinais e assim, calcular a velocidade da pelota.

**Palavras-chave:** Hidrotransporte; Radiação gama; “Cross-Correlation”; Pelota.

## FLOW MONITORING IN HYDROTRANSPORT UNITS OF ORE USING GAMMA SCATTERING AND "CROSS-CORRELATION" TECHNIQUE

### Abstract

The proposal of this research was to develop a methodology that employs gamma radiation and Cross-Correlation technique to measure the speed of the ore pellets in the duct. A experimental unit was designed and built to be carried out simulations of two-phase flows, using a flow meter, installed externally to the tube, consists of two independent systems, each consisting of a <sup>241</sup>Am gamma radiation source (59.62 keV of energy) and a scintillator NaI detector (1 x 1 "). These systems were located in the same vertical plane and separated by a distance of about 18.0 cm. As pellets, were produced specimens of different composition in order to obtain a spectrum of densities to verify the validity of the methodology. The results showed that the use of gamma densitometry associated with the measurement of coefficient of "Cross-Correlation" allowed it to be calculated the transient time between two signals, and thus made it possible to calculate the speed of pellet.

**Keywords:** Hydrotransport; Gamma radiation; Cross Correlation; Pellet.

<sup>1</sup> *Engenheiro Metalúrgico, aluno de mestrado em Engenharia Nuclear, Instituto de Engenharia Nuclear, Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, Brasil.*

## 1 INTRODUÇÃO

A medição de fluxo de massa de um determinado produto é essencial para o adequado controle das diversas operações que ocorrem no ambiente industrial. Uma grande vantagem do uso de técnicas nucleares, empregando medidores não invasivos é realizar análises sem influência no funcionamento da instalação, bem como reduzir o desgaste causado por contato de material sólido abrasivo com o dispositivo de medição. Além disso, a alta sensibilidade dos sistemas de detecção usado, permite o uso de fontes de radiação com baixa intensidade, minimizando o risco radiológico potencial para a saúde dos trabalhadores expostos e também sem causar dano ou contaminação radiológica-químicos para o equipamento e o ambiente. [1]

### 1.1 Objetivos

- Desenvolvimento de dispositivo não invasivo empregando fonte de radiação gama e detectores cintiladores;
- Estudo e otimização da geometria de contagem para os sistemas fonte-detector;
- Desenvolvimento de metodologia para o cálculo da velocidade de pelotas usando a técnica de “Cross-Correlation”.

### 1.2 Revisão Bibliográfica

Atualmente, o hidrotransporte é uma das formas mais econômicas de transporte para grandes volumes. Uma característica peculiar de um mineroduto está relacionada à sua natureza, já que pode operar 24 horas por dia, exigindo pausas apenas para manutenção periódica. O transporte ocorre dentro de uma linha de tubos, e a circulação dos produtos ocorre sob pressão ou arraste de um fluido. No entanto como principal desvantagem não mostra flexibilidade, pois a rota é fixa.

Um parâmetro importante de saber é a velocidade crítica de sedimentação. Na prática industrial, esta velocidade corresponde o menor valor da velocidade do fluxo em que há risco de sedimentação dos sólidos e depende dos seguintes fatores: tamanho do material, peso específico, diâmetro do tubo, concentração de sólidos, pH da polpa. No entanto, há um limite máximo para a velocidade de misturas sólido-líquido de bombeamento, sendo definido como a menor velocidade média que causa desgaste abrasivo significativo na tubulação.

Finalmente, um sistema de monitoramento deve ser projetado para controlar e supervisionar a polpa que atravessa o tubo, a fim de detectar vazamentos e obstruções. Deve-se lembrar que um programa de monitoramento irá resultar em um melhor desempenho, permitindo a operação do mineroduto com a máxima eficiência. [1]

### 1.3 Espectroscopia com Detectores Cintiladores

A espectroscopia de uma fonte de radiação utilizando um detector cintilador envolve a medição da faixa de distribuição da energia da partícula produzida com o decaimento dos núcleos de átomos radioativos presentes na fonte.

O detector registra os fótons com ligeiras diferenças em sua energia, ocorrendo alargamento em sua energia característica, porque a energia da faixa de transição não é registrada pelo sistema de detecção de forma idêntica para todas as transições, devido principalmente a pequenas variações de tensão e ruídos eletrônicos. Este parâmetro, chamado Resolução de Energia, avalia a capacidade do detector de distinguir dois raios gama com energias semelhantes.

A eficiência de um detector é função das características do sistema de contagem e depende do tamanho da fonte e do detector, da composição do cristal cintilador, da distância entre a amostra e o detector e a energia dos fótons. Utilizada na comparação dos resultados de detectores. [1]

## 2 MATERIAIS E MÉTODOS

Foram usadas duas fontes de radiação gama, selado de  $^{241}\text{Am}$ , cujo espectro é ilustrado na Figura 1:

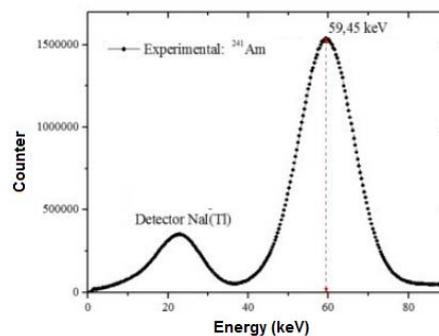


Figura 1: Espectro de uma fonte  $^{241}\text{Am}$ . [1]

Procedimentos para a calibração de detectores consistiram no levantamento da curva característica do detector para o estabelecimento da tensão de operação, medição da eficiência e o cálculo da resolução de energia para o valor da fonte citada utilizando o valor de 59,6 keV.

O módulo de contagem é composto por 12 analisadores monocal independentes para medidas controladas via software (contador de Ludlum measurements, Inc. versão 2.2.2). Para cada um dos dois detectores, o módulo de contagem permite ajustar a tensão de funcionamento e a discriminação de pulsos. Este módulo permite a aquisição contínua de dados com frequência mínima de 20 Hz (20 dados/segundo) para cada detector.

O tempo total da aquisição de dados foi definido de acordo com as necessidades de cada experimento. Através deste processo, o arquivo com os dados armazenados foi processado, e os resultados da CPS (contagens por segundo) foram plotados em um gráfico.

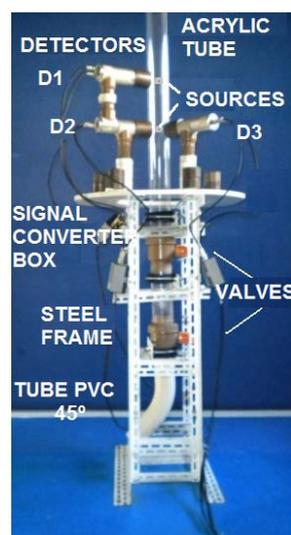
Os corpos de prova foram fabricados com o auxílio de moldes de silicone, em formato esférico, com variação de densidade. Como primeiro passo, foram fabricados sólidos com densidade ligeiramente acima da densidade da água, para permitir a calibração do sistema de medição. Para a composição, foram sugeridos vários elementos com diferentes densidades (poliestireno, celulose, cimento, massa acrílica e gesso). Decidiu-se fazer uma liga com o máximo de componentes distintos, onde fosse possível determinar as frações relativas de cada um, onde deveria haver um elemento com densidade inferior da água (poliestireno ou celulose). A escolha

da composição dos corpos de prova a ser usado nos testes dependeu da mistura que apresentou a melhor uniformidade e rigidez, bem como a que possibilitou a mais baixa absorção de água (para haver conservação de massa e volume).



**Figura 2:** Corpos de prova produzidos com variação de densidade. [1]

A unidade experimental foi composta de uma armação de aço para suportar o tubo acrílico. Foram adicionadas duas válvulas controladoras de fluxo para o tubo (para minimizar gastos com água) e um tubo curvo de 45° de PVC ao final da tubulação, que visava facilitar a eliminação dos sólidos. Na parte superior do suporte metálico foi acoplada uma plataforma rígida de PVC, onde foram instalados suportes para detectores. Um dos suportes permitiu a instalação de dois detectores alinhados verticalmente e distanciados de 0,18 m, chamado D1 e D2, que foram empregados para registrar os movimentos das pelotas. O sistema de medida permitiu a instalação de um terceiro detector D3, coplanar a D2, que permite estudar o perfil de deslocamento das pelotas. No entanto, este será objeto de um estudo posterior. Para cada detector foi colocado na face diametralmente oposta ao tubo uma fonte radioativa  $^{241}\text{Am}$ . Cada detector foi conectado a dois cabos coaxiais, um que fornece a tensão e o outro que retorna o sinal do intervalo de pulsos registrados pelo cristal cintilador. Esses cabos foram conectados a uma caixa conversora de sinal para promover o ajuste da impedância entre o detector e o módulo de aquisição de dados.



**Figura 3:** Unidade experimental. [1]

Antes da execução dos testes foi conduzida a modelagem matemática do deslocamento de uma pelota na água para ser verificada a validade dos procedimentos de cálculo de sua velocidade.

Como dados de entrada, foram utilizados os resultados das contagens registradas pelos detectores, fornecendo um valor teórico de 0,28 s para o transiente de tempo (calculado a partir de equações de cinemática) e um valor dentro de um limite predeterminado de precisão (da ordem de 1%) usando o código MCNP-X.

O programa considera os sólidos como esferas perfeitas, por este motivo que foi estabelecido que na fase de preparação de amostras, o formato seria esférico para que fosse possível comparar os valores simulados com os valores medidos experimentalmente.

Em cada intervalo de tempo (o equivalente a 50 ms), a posição central e a velocidade da pelota foram calculadas e então obteve-se a taxa de contagem de fótons gama transmitidas e registradas no detector.

A primeira simplificação foi considerar o sinal de passagem da pelota pelo detector como pulso quadrado invertido, e a largura de pulso igual ao valor do tempo gasto para a passagem de uma esfera diante da face do detector. O detector ainda foi considerado totalmente blindado e a frente totalmente exposta à radiação.

### 3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

O método para a obtenção de dados foi o Correlator Original que usa Transformada de Fourier para pulso com formato crescente (quadrado ou gaussiano) ou decrescente, como no modelo estabelecido para a pelota. [1] O esquema do Correlator Original é ilustrado na Figura 4:

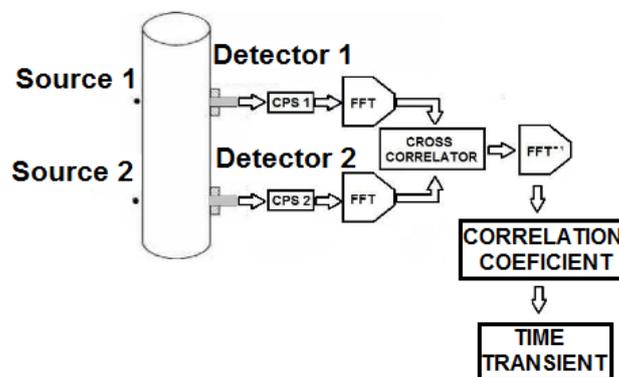


Figura 4: Método do Correlator Original. [1]

Em métodos diretos, a janela de dados,  $J$ , é fixada como sendo igual a metade do número de dados do arquivo de entrada. Para cada experimento foi calculado o coeficiente de correlação e transiente de tempo, usando um valor teórico igual a 0,28 s. Para o teste descrito abaixo foram utilizados os corpos de prova chamados P2: 10% poliestireno + 10% cimento + 80% gesso, com 2 cm de diâmetro.



Figura 5: Corpos de prova P2. [1]

As pelotas foram lançadas em queda da livre (com velocidade inicial nula), sendo o tubo totalmente cheio de água. Diferente da simulação matemática baseada no movimento retilíneo, as pelotas descreveram trajetórias irregulares e, observou-se que houve interação entre elas (colisões), destacando a complexidade do movimento real no interior do duto.

Uma situação que ocorre com frequência durante a operação de um mineroduto é a formação de um leito móvel, onde as partículas que se movimentam na borda possuem velocidade mais lenta. Simulou-se este cenário pela liberação de um conjunto de 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 6, onde os picos entre  $t = 25,0$  s e  $t = 33,0$  s demonstram que as pelotas P2 são registradas. No entanto, o movimento das esferas de acrílico não é evidenciado com uma estrutura típica na curva, porque o coeficiente de atenuação do acrílico (PMMA de polimetacrilato de metilo) é próximo da água, então a interação de fótons gama nas duas substâncias é muito semelhante.

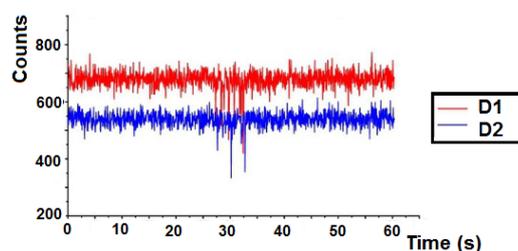
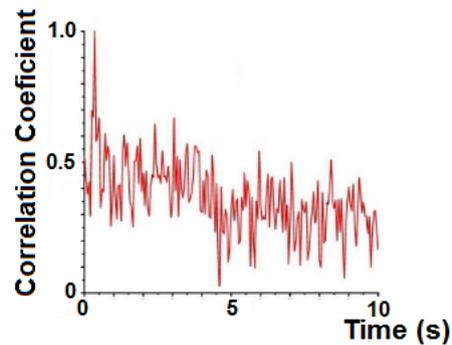


Figura 6: Passagem do leito móvel e pelotas P2 entre D1 e D2. [1]

As pelotas P2 também não se deslocaram como um único conjunto devido à presença de um grande número de esferas de acrílico, formando três grupos distintos, evidenciados pela presença de três picos com intensidades menores ( $t = 27,5$  s,  $t = 30,0$  s e  $t = 32,5$  s). Por outro lado, como as esferas de acrílico não se moveram de forma ordenada, o sinal gravado pelos detectores apresenta a forma de um ruído.

Como se pode ver na Figura 7, o coeficiente de correlação entre D1 e D2 apresenta um máximo mais intenso para  $t = 0,963$  s, o que corresponde a passagem de pelotas P2. Entre  $t = 0,94$  s e  $t = 4,63$  aparece o que é chamado de "estrutura de banda", que corresponde ao movimento lento de partes do leito móvel.



Time Transient =  $(0.371 \pm 0.009)$  s  
Velocity =  $(48.52 \pm 2.94)$  s

Figura 7: Coeficiente de correlação do leito móvel e pelotas P2. [1]

#### 4 CONCLUSÃO

Os resultados provaram que a proposta principal da pesquisa foi alcançada, mesmo persistindo ainda a dificuldade de medir a velocidade de pelotas dentro do mineroduto.

A associação entre os sinais registrados pelos dois detectores e a medição da função “Cross-Correlation”, permitiu que fosse calculada a velocidade de pelotas de minério.

Como discutido, a técnica de medição da função “Cross-Correlation” usando a Transformada de Fourier permitiu obter resultados com incertezas da ordem de 1%. Finalmente, uma dificuldade notada na implementação da pesquisa foi medir a velocidade de pequenas pelotas que se movimentavam rapidamente. Por esta razão pode ser proposto como objeto de trabalho futuro, a otimização da distância entre os detectores, porque este parâmetro leva em conta o tipo (dimensão, densidade) das pelotas que serão monitoradas.

#### REFERÊNCIAS

- 1 Siciliano, U. C. C. S., Monitoramento De Vazão Em Unidades De Hidrotransporte De Minério Empregando Espalhamento Gama E Técnica De “Cross-Correlation”, Engº Metalúrgico, Universidade Federal Do Rio De Janeiro, Rio De Janeiro, Rio De Janeiro, Brasil, 2014.