

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS**  
**DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA DE MINAS**  
**Curso de Especialização em Engenharia de Recursos Minerais**

Bruno Henrique Braga Machado

**CONTROLE DE PROCESSOS NAS OPERAÇÕES DE**  
**ESPIRAIS CONCENTRADORAS COM UTILIZAÇÃO DE FRX**  
**PORTÁTIL**

Belo Horizonte

2022

BRUNO HENRIQUE BRAGA MACHADO

**CONTROLE DE PROCESSOS NAS OPERAÇÕES DE ESPIRAIS  
CONCENTRADORAS COM UTILIZAÇÃO DE FRX PORTÁTIL**

Artigo apresentado ao Programa de Pós Graduação em Engenharia de Minas da Universidade Federal de Minas Gerais (UFMG) como requisito para obtenção do título de Especialista em Engenharia de Recursos Minerais.

Orientadora: Professora Dra. Andreia Bicalho Henriques

Belo Horizonte

2022

## ATA DA DEFESA DO ARTIGO DO ALUNO BRUNO HENRIQUE BRAGA MACHADO

Realizou-se, no dia 15 de dezembro de 2022, às 15:00 horas, na plataforma MS Teams, da Universidade Federal de Minas Gerais, a defesa de Artigo intitulado “**CONTROLE DE PROCESSOS NAS OPERAÇÕES DE ESPIRAIS CONCENTRADORAS COM UTILIZAÇÃO DE FRX PORTÁTIL**”, apresentado por BRUNO HENRIQUE BRAGA MACHADO, número de registro 2020719910, graduado em ENGENHARIA DE MINAS, como requisito parcial para a obtenção do certificado de Especialista em ENGENHARIA DE RECURSOS MINERAIS, à seguinte Comissão Examinadora: Professora Andreia Bicalho Henriques- Orientadora, Professor Roberto Galery (Universidade Federal de Minas), Professora Juliana Angélica Evangelista de Carvalho (Faculdades Kennedy – BH)

A comissão considerou a defesa do artigo:

Aprovada

Reprovada

Nota: **90,0**

Finalizando os trabalhos, lavrei a presente ata que, lida e aprovada, vai assinada por mim e pelos membros da Comissão.

Belo Horizonte, 15 de dezembro de 2022.

  
Professora Andreia Bicalho Henriques (Doutora)

  
Professor Roberto Galery (Doutor)

  
Professora Juliana Angélica Evangelista de Carvalho (Doutora)

  
Risia Magriotis Papini  
Coordenadora do Curso de Especialização  
em Engenharia de Recursos Minerais

  
Aurea Domingos  
Secretaria do Curso de Especialização  
em Engenharia de Recursos Minerais

## **AGRADECIMENTOS**

Este trabalho foi elaborado com a contribuição e ativa participação de Jardel Almeida a quem agradeço a grande dedicação.

À Mineração Morro do Ipê por todo suporte oferecido à elaboração deste trabalho.

## RESUMO

A aplicação de espirais concentradoras no beneficiamento de minério de ferro é comumente utilizada na etapa de concentração em função dos baixos investimentos despendidos e também os custos operacionais aplicados. Entretanto, os ajustes de suas variáveis e regulagens é ainda um processo que ocorre de maneira visual e manual. Nesse contexto é necessário que os operadores possuam vivência com esse tipo de equipamento e a tomada de decisão em sua maioria das vezes é realizada de maneira empírica. Para minimizar essas condições, foi implementada uma forma de análise rápida dos resultados de qualidade dos produtos, com a utilização de um Espectrômetro de Fluorescência de raios-X portátil (FRX-P). A realização de medições e controles em menor intervalo de tempo propiciam embasamento mais rápido para deliberação dos comandos para ajustes das variáveis nas etapas de Concentração por Espirais. Essa assertividade contribui para uma maior estabilidade da qualidade dos produtos, frente a variabilidade da alimentação. Esse trabalho irá demonstrar os resultados da aplicação do FRX portátil nas análises dos concentrados das espirais e a metodologia para calibração do equipamento de modo a se tornar usual e mostrar a evolução do controle de processos, aumentando a estabilidade da etapa e trazendo maior homogeneidade dos teores dos concentrados. Para além desses benefícios, a utilização da metodologia contribui para elevação dos teores de ferro nos concentrados e recuperação em massa.

**Palavras-chave:** Controle de Processos, Espirais Concentradoras, Espectrômetro de Fluorescência de raios-X.

## **ABSTRACT**

The application of spiral concentrators in iron ore processing is commonly used in the concentration stage due to the low investments and also the operating costs applied. However, adjusting its variables and settings is still a visual and manual process. In this context, it is necessary for operators to have experience with this type of equipment and decision-making is most often carried out empirically. To minimize these occurrences, a form of rapid analysis of product quality results was integrated by using a portable X-ray Fluorescence Spectrometer (XRF-P). Carrying out measurements and controls in a shorter time interval allows a faster basis for deliberating the commands for adjusting the variables in the Spiral Concentration's steps. This assertiveness contributes to greater stability of product quality, given the variability of feed. This paper will demonstrate the results of the application of the portable FRX in the analysis of the concentrates of the spirals and the methodology for calibration of the equipment in order to become usual and show the evolution of the control of processes, increasing the stability of the step and bringing greater homogeneity of the contents of the concentrates. In addition to these benefits, the use of the methodology contributes to increasing the iron content in concentrates and mass recovery.

**Keywords:** Process control, Concentrator Spirals, X-ray Fluorescence Spectrometer.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 01: Parâmetros geométricos de uma espiral concentradora.....	09
Figura 02: Faixas de Performance de Operação da Espiral HC33 .....	10
Figura 03: Fluxograma Básico – Circuito de Concentração por Espirais .....	11
Figura 04: Esquema de Funcionamento de um Equipamento de Análise por FRX.....	12
Figura 05: Esquema Básico de um Analisador Portátil (FRX-P).....	14
Figura 06: Diversos tipos de amostras que podem ser analisadas pelo FRX-P.....	15
Figura 07: Efeitos da Heterogeneidade Granulométrica na Camada de Leitura da Amostra.....	15
Figura 08: FRX Portátil modelo S1 TITAN 600.....	16
Figura 09: Representação das Amostras Analisadas no Teste Inicial .....	17
Figura 10: Teor de Fe em Amostras Analisadas em Laboratório x Teor de Fe em Amostras Analisadas com FRX Portátil. ....	18
Figura 11: Exemplo de Inserção de Fator de Correção no Equipamento FRX-P.....	19
Figura 12: Representação da Coleta dos Incrementos das Amostras de Produto da Concentração por espirais.....	22
Figura 13: Representação da Primeira Fase de Homogeneização e Quarteamento das Amostras de Produto da Concentração por espirais. ....	23
Figura 14: Representação da Disposição da Amostra em Chapa Térmica para Secagem. ....	23
Figura 15: Representação da Homogeneização e Quarteamento da Amostra Seca em Divisor Rifles. ....	23
Figura 16: Representação da Amostra Sendo Pulverizada em Moinho de Peneiras .....	24
Figura 17: Representação da Amostra Sendo Analisada no FRX-P. ....	24
Figura 18: Representação dos Resultados das Análises do FRX-P. ....	25
Figura 19: Representação da Divulgação dos Resultados das Análises do FRX-P Durante o Turno. .	25
Figura 20: Comparação Dos Teores de Fe entre Resultados do Analisador FRX-P e Resultados do Laboratório. ....	26
Figura 21: Comparação Dos Teores de SiO <sub>2</sub> entre Resultados do Analisador FRX-P e Resultados do Laboratório. ....	26

Figura 22: Correlação Entre Teores de Fe dos Resultados do FRX-P e Resultados do Laboratório. .. 26

Figura 23: Correlação Entre Teores de SiO<sub>2</sub> dos Resultados do FRX-P e Resultados do Laboratório.  
..... 27

### **LISTA DE TABELAS**

Tabela I: Resultados das Análises Iniciais com FRX-P (%Fe – Padrão GeoMining). ..... 17

Tabela II: Resultados de Repetibilidade das Análises (%Fe) ..... 18

Tabela III: Comparação dos Resultados do Analisador FRX-P versus Resultados do Laboratório (Amostras Brutas). ..... 20

Tabela IV: Comparação dos Resultados do Analisador FRX-P versus Resultados do Laboratório (Amostras Pulverizadas). ..... 21

Tabela V: Comparação da Estatística Descritiva dos Resultados de Qualidade de Um Período Antes da Utilização do FRX-P com um Período Após a Utilização do FRX-P..... 27

Tabela VI: Comparação dos Resultados dos Parâmetros de Processo da Etapa de Concentração por Espirais Antes e Após a Utilização do FRX-P ..... 28



## SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO .....	8
2. REVISÃO .....	8
3. MATERIAIS E MÉTODOS .....	16
4. RESULTADOS E DISCUSSÕES .....	25
5. CONCLUSÕES.....	28
6. REFERÊNCIAS.....	29

## 1. INTRODUÇÃO

A planta de beneficiamento da Mineração Morro do Ipê, possui várias operações unitárias, dentre elas, a etapa de concentração por utilização de espirais. Essa operação é a que mais apresenta um alto desvio padrão nos seus resultados, principalmente na qualidade dos concentrados. Essa instabilidade se dá, na maioria das vezes, pela falta de conhecimento prévio dos teores físico-químicos da alimentação, associado a falta de resultados de qualidade dos concentrados com maior periodicidade e menor intervalo de tempo.

Uma das soluções encontradas foi a implantação de uma forma de análise rápida dos resultados de qualidade dos produtos, com a utilização de um espectrômetro de fluorescência de raios-X portátil (FRX-P). Dessa forma foi possível realizar medições mais frequentes e controlar resultados com menor intervalo de tempo, melhorando assim o tempo de resposta.

Os resultados encontrados passaram a ser alavancas para as tomadas de decisão de ajustes de variáveis nas etapas de Concentração por Espirais, visando uma maior estabilidade da qualidade dos produtos, frente a variabilidade da alimentação.

Os objetivos gerais deste trabalho serão apresentar os resultados obtidos com a aplicação do FRX portátil nas análises dos concentrados das espirais, bem como a metodologia para calibração do equipamento de modo a se tornar prático do ponto de vista operacional. Os benefícios e evoluções do controle de processos, como a redução de variabilidade e/ou aumento de estabilidade dos teores dos concentrados, também serão detalhados com a finalidade de demonstrar a majoração do teor de ferro nos produtos e recuperação em massa, considerando as condições de instabilidade na alimentação inerentes ao processo.

## 2. REVISÃO

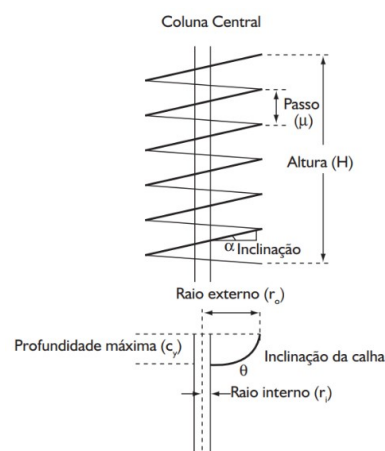
### **Aplicação de Concentração Gravimétrica por Espirais em Minério de Ferro**

A concentração gravítica é um dos métodos mais antigos de processamento mineral, é um processo em que partículas de diferentes tamanhos, formas e densidades, são separadas por ação de forças da gravidade ou centrífugas [11].

O primeiro modelo de espiral (Humphreys) foi aplicado em 1943 no processamento de cromo. Segundo Arenare et al., [2], em 1960 foi realizada a primeira utilização de espirais

concentradoras no processamento de minérios de ferro. Desde então, vem sendo empregada por diversas empresas que realizam o beneficiamento de minério de ferro. Os custos operacionais e de instalação são relativamente baixos, mas sua aplicação se restringe a uma faixa granulométrica específica, onde a concentração de frações finas ( $<0,038\text{mm}$ ) se torna inviável.

A espiral concentradora consiste em uma disposição helicoidal de calhas ao redor de uma coluna central e suas principais variáveis geométricas são: o passo, a altura, a inclinação e a inclinação radial da calha [2], conforme mostrado na figura 01.



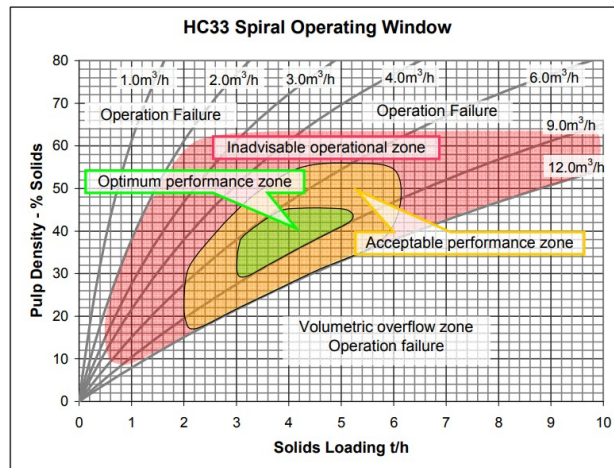
**Figura 01** – Parâmetros geométricos de uma espiral concentradora [2].

Na operação da espiral a polpa de alimentação é introduzida no topo da espiral e à medida que flui para baixo em espiral, as partículas estratificam-se devido ao efeito combinado da força centrífuga, das taxas de sedimentação diferencial das partículas e ao efeito intersticial através do leito. Estes mecanismos são complexos, sendo muito influenciados pela densidade da suspensão e pelo tamanho das partículas [14].

Outra adaptação que propicia a uma melhor concentração dos minerais, principalmente onde o range de densidades entre eles é pequeno, é a utilização de água de lavagem. Segundo Lins [6] essa água, ao sair sob pressão, centrifuga os minerais leves para a parte periférica da espiral, favorecendo o processo de separação.

Dentro da operação unitária de concentração por espirais, existem uma série de variáveis que influenciam em seus resultados de recuperação e qualidade do concentrado, tais como os teores (qualidade) da alimentação, taxa de alimentação, porcentagem de sólidos na alimentação (densidade da polpa de alimentação), tamanho das partículas, pressão e vazão de água de lavagem, regulagem das régua coletoras e regulagem dos desviadores das calhas [2].

As Espirais concentradoras modelo HC 33, fabricadas pela Mineral Technologies, possuem 920mm de diâmetro e 6 voltas por espiras. Sua capacidade indicada é de 3 a 6 t/h/pista, 30 a 50% de sólidos e com o faixa de granulometria de 0,03mm a 2,0mm [8]. A figura 02 mostra a faixa ótima de trabalho especificada pelo fabricante.



**Figura 02** – Faixas de Performance de Operação da Espiral HC33 [8]

### **Circuito de Concentração por espirais na Mineração Morro do Ipê**

Atualmente as Operações de Beneficiamento da Mineração Morro do Ipê, são compostas por instalações de processamento a seco (móveis e semimóveis) e uma instalação de beneficiamento a úmido, composta por duas linhas de alimentação, a IB (Instalação de Britagem) e a IC (Instalação de Concentração).

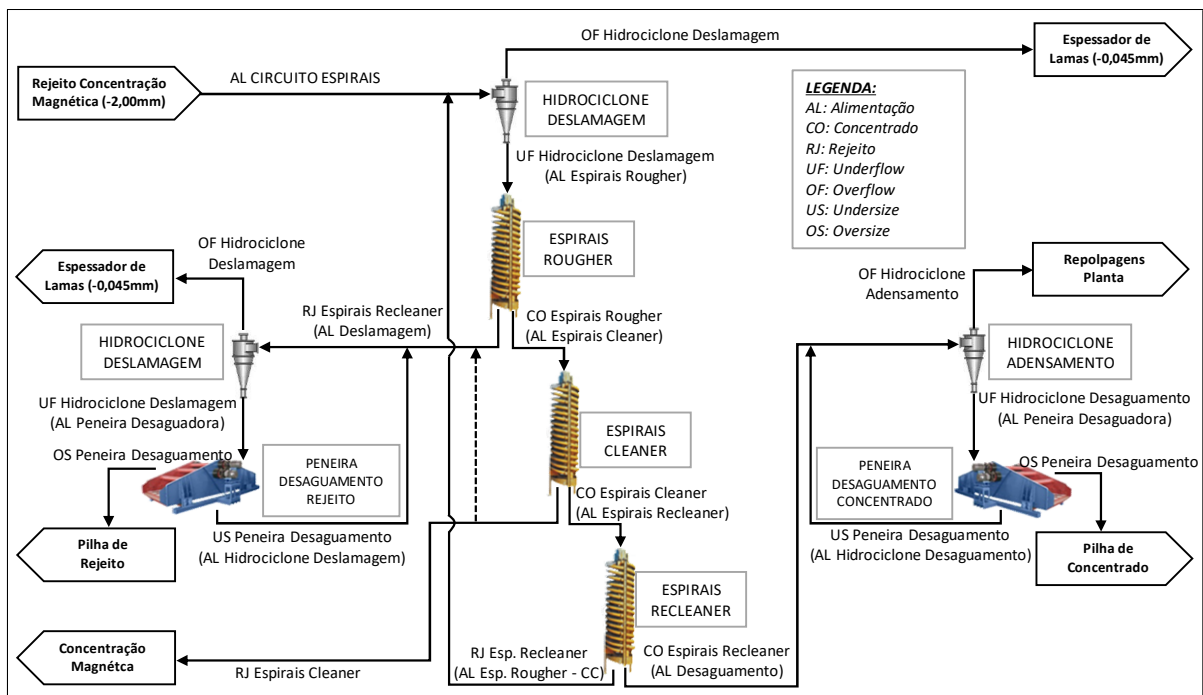
A instalação de beneficiamento a úmido é composta pelas operações unitárias de cominuição (britagens primária e secundária), classificação (peneiramento e hidrocicloneamento), concentração (concentração magnética de alta e média intensidade, concentração gravimétrica por espirais concentradoras) e separação sólido/líquido (peneiramento de desaguamento, hidrocicloneamento de adensamento, espessamento e filtragem de rejeitos).

Os produtos gerados são o “Lump Ore” e “Finos”, os finos são compostos pelos produtos “Sinter Feed” grosso natural, “Concentrado Magnético” e “Concentrado Espirais”.

A concentração gravimétrica por espirais na usina de concentração da Mineração Morro do Ipê é composta por etapas rougher, cleaner e recleaner (espirais HC33/Mineral Technologies, 3 espiras/calhas, 6 voltas, com água de lavagem em todas as etapas). As Espirais são alimentadas com o rejeito proveniente do circuito de concentração magnética

(fração menor que 2,00mm), onde o fluxo é deslamado em hidrociclones antecedentes a alimentação. O “underflow” dos hidrociclones deslamadores é encaminhado a alimentação da etapa “Rougher” das espirais concentradoras (16 colunas de espirais).

O concentrado das espirais “Rougher” segue para as espirais “Cleaner” (10 colunas de espirais), o rejeito vai para etapas posteriores de desaguamento. O concentrado das espirais “Cleaner” vai para a alimentação das espirais “Recleaner” (6 colunas de espirais) e o rejeito retorna para as etapas de concentração magnética da planta. O rejeito “Recleaner” (carga circulante) retorna para a alimentação da etapa “Rougher”, o concentrado (concentrado final) segue para o circuito de desaguamento, onde o material é adensado em hidrociclones e o “underflow” vai para peneira desaguadora em que o retido (concentrado desaguado) é descarregado no transportador de correias e segue para a pilha de concentrado das espirais no pátio de produtos. O passante retorna como carga circulante no circuito hidrociclone/peneira. A figura 03, representa o fluxograma básico do circuito de operação das espirais concentradoras na usina de concentração.



**Figura 03** – Fluxograma Básico – Circuito de Concentração por Espirais – (Arquivo Interno Mineração Morro do Ipê, 2022)

### Métodos de Análise Elementar por Fluorescência de Raios-X

A método analítico de fluorescência de raios-X (FRX) tem sido utilizada para a avaliação qualitativa e quantitativa de espécies químicas em vários tipos de amostras, nos

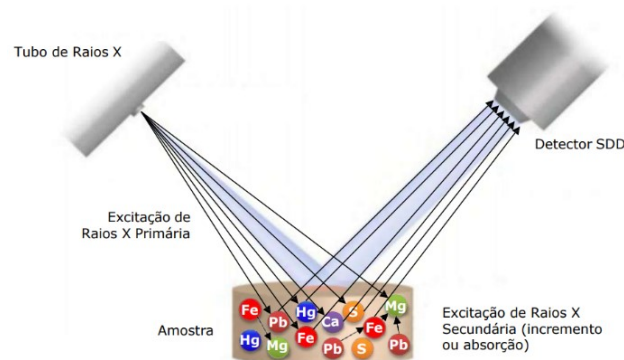
seguimentos agropecuário, agroindustrial, geológico e ambiental. Sua aplicação se mostra muito viável por ser um método de análise instrumental, não destrutiva e por permitir a análise de vários elementos ao mesmo tempo, com baixo custo e de maneira rápida [12].

Conforme Melo Junior [7], o método de análise por fluorescência de raios-X, utiliza o princípio da medição da intensidade dos raios-X emitidos pelos elementos químicos que compõem o material a ser analisado, quando são excitados por partículas como elétrons, prótons ou íons gerados em tubos de raio-X, ondas eletromagnéticas ou aceleradores de partículas.

A fluorescência de raios-X, traz sua base na geração e detecção de raios-X, onde radiações eletromagnéticas de alta frequência com pequenos e característicos comprimentos de onda, produzidos pelo fenômeno fotoelétrico, emitidos pelos elementos constituintes da amostra quando irradiada com elétrons, prótons, raios-X ou gama com energias apropriadas. A radiação eletromagnética incidente interage com a amostra, podendo ocorrer absorção, emissão e espalhamento de radiação eletromagnética [13].

Estima-se hoje que a FRX é uma das técnicas mais disseminadas e usadas em todo o mundo, ocupando um lugar de destaque, principalmente para aquelas áreas em que a obtenção de rápido perfil de constituintes metálicos e não-metálicos é indispensável [9]

Os raios-X incidentes excitam os átomos constituintes da amostra, que por sua vez emitem linhas espectrais com energias características do elemento e cujas intensidades estão relacionadas com a concentração [5]. Assim, de modo resumido, a análise por fluorescência de raios-X consiste em três fases: excitação dos elementos que constituem a amostra, dispersão dos raios-X característicos emitidos pela amostra e detecção desses raios-X, conforme mostrado na figura 04 [3].



**Figura 04** – Esquema de Funcionamento de um Equipamento de Análise por FRX [3]

Grande parte dos equipamentos utilizados atualmente para análises de rotina, utilizam o princípio da fluorescência de raios-X com energia dispersiva (FRX-DE), por apresentar as vantagens de baixo custo de análise, baixo consumo de reagentes e utensílios dos laboratórios, geração de pouco resíduo e baixo custo de investimento [12].

A FRX-DE é uma técnica analítica nuclear, instrumental, multielementar e simultânea baseada na medição das intensidades de raios-X característicos emitidos pelos elementos que constituem a amostra a partir de excitação por meio de um feixe de raios-X. O termo “energia dispersiva” refere-se à técnica de detecção dos raios-X emitidos, que é efetuada por um detector de silício, que gera um espectro de intensidade em função da energia. A intensidade da energia característica emitida pelos componentes da amostra está relacionada com a concentração de cada elemento presente na amostra [1].

O rápido desenvolvimento dos detectores semicondutores contribuiu para aumentar e diversificar as aplicações com os sistemas de fluorescência de raios-X por dispersão de energia [10].

### **Métodos de Análise Elementar por Fluorescência de Raios-X Equipamento Portátil**

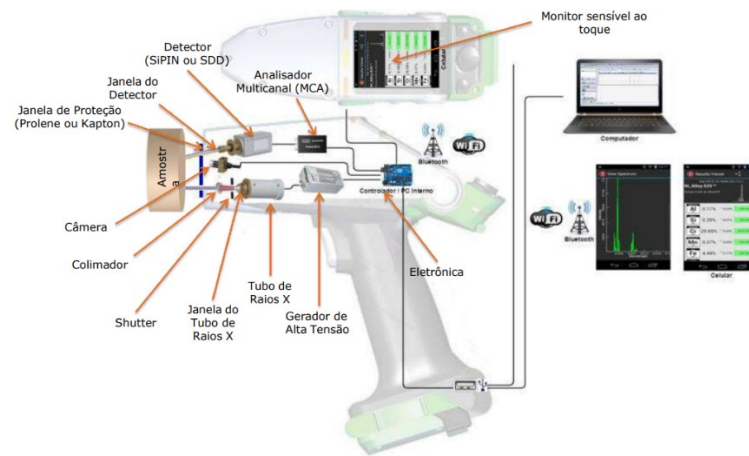
A fluorescência de raios-X portátil (FRX-P) é uma variante técnica analítica de fluorescência de raios X por Dispersão de Energia (FRX-DE) e atualmente é amplamente utilizada para determinação da composição elementar nos mais diferentes tipos materiais e nos mais variados segmentos como Análise de Metais e Ligas, Catalisadores, Identificação Positiva de Materiais, Mineração e Exploração Mineral, Agricultura, Alimentos e Bebida, Polímeros e Plásticos e Petroquímica [3].

A FRX-P também é bastante utilizada em aplicações industriais, que frequentemente requerem rotinas analíticas rápidas para controle de qualidade de seus produtos, assim como as análises exploratórias utilizadas em geologia [12].

Para determinações quantitativas, onde os limites de detecção, precisão e exatidão podem ser menos rígidos, ou quando o custo inicial é o fator preponderante, o FRX-DE pode apresentar a melhor solução em custo-benefício [12].

Embora os equipamentos de fluorescência de raios-X portáteis sejam extremamente compactos e leves, possuem atualmente desempenho similar aos equipamentos tradicionais de laboratório. Portanto, mostram grande aplicabilidade para análises em campo, com respostas

rápidas e assertivas [3]. A figura 05 apresenta o esquema básico de um analisador por fluorescência de raios-X portátil (FRX-P).



**Figura 05** – Esquema Básico de um Analisador Portátil (FRX-P) [3].

O analisador FRX-P, pode ser utilizado na detecção elementar em diversos tipos de amostras [3].

- Amostra bruta (análise direta): Método mais rápido de análise. Apresenta resultados, normalmente, orientativos por causa da baixa representatividade da amostra (heterogeneidade, irregularidade da superfície, efeitos mineralógicos, dentre outros). Tais efeitos podem ser minimizados utilizando análise de pequenos pontos com equipamentos portáteis ou micro-FRX;
- Pó Solto: inserido em um copo (cubeta) com uma membrana e é medido diretamente, provendo um método rápido e de simples preparação (~1 min) e podendo apresentar bons resultados de precisão e exatidão para controle de processos. A pulverização e homogeneização faz com que se minimize os efeitos da heterogeneidade, tamanho de partículas e “espaços vazios” da amostra. O tamanho ideal da partícula deve ser menor que 50 $\mu$ m.
- Pastilha prensada: O pó solto (pulverizado) é prensado em anéis de aço ou copos de alumínio (~6 min). O pó prensado forma uma superfície mais plana, minimizando efeitos de irregularidade da superfície, e uma amostra mais compacta, diminuindo efeitos de espaços vazios. Isso provê resultados mais precisos e exatos, fazendo com que seja um método amplamente usado para controle de qualidade e processos.
- Pérola fundida: O material pulverizado é fundido com fluxo de Tetraborato de Lítio, Metaborato de Lítio ou suas misturas, formando uma pérola estável de vidro (amorfo). Os efeitos de matriz são minimizados e os mineralógicos são eliminados, sendo o



método mais preciso e com maior exatidão para análise de diversos tipos de amostras com uma mesma curva de calibração.

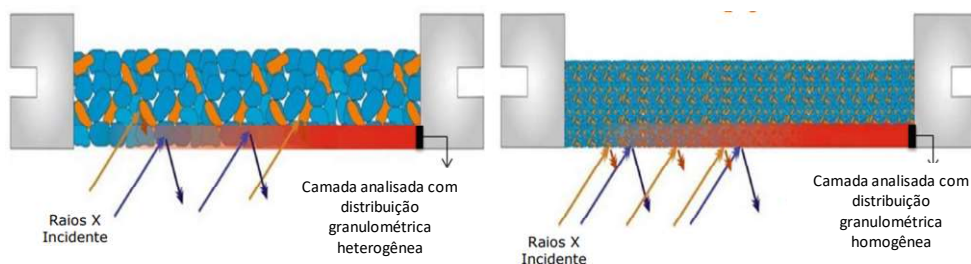
- Líquidos: O líquido é colocado em um copo com uma membrana e medido sem qualquer preparação de amostra (análise direta). Na análise de líquidos é possível somente medir elementos de Na (massa atômica: 23u) a U (massa atômica: 238u) e requer atmosfera de He para análise de elementos leves (Menores que Ti – massa atômica: 48u), principalmente em equipamentos de bancada ou grande porte.
- Metais, ligas e Polímeros: Metais e Ligas (Aço, Alumínio, Ferro, Zinco, dentre outras) requer preparação da superfície (plana) com plaina para materiais moles (ex. Pb e Al) e polimento para materiais duros (ex. Aço, Ferro). Após isso é necessários limpeza da superfície (ex. álcool). Para polímeros e plásticos (PE, PP, PVC, ABS, etc.) devem ser prensados a quente ou lidos em copos para líquidos para análises qualitativas.

A figura 06 ilustra os diversos tipos de amostras que podem ser analisadas pelo FRX-P [3].



**Figura 06** – Diversos tipos de amostras que podem ser analisadas pelo FRX-P [3]

As etapas de cominuição e classificação no beneficiamento mineral, produzem partículas de diferentes tamanhos e formas, que influenciam diretamente na espessura da camada e planicidade da superfície a ser analisada, conforme demonstrado na figura 07 [3].



**Figura 07** – Efeitos da Heterogeneidade Granulométrica na Camada de Leitura da Amostra [3].

Tais características, podem ser minimizadas com a prensagem da amostra e principalmente com a fusão (pérola fundida), removendo assim, os efeitos do tamanho e forma das partículas, assim como o efeito da superfície irregular e mineralógico (devido a amorfização do material) da amostra. Outros fatores como umidade e temperatura da amostra, diluição (proporção do ligante ou fundente) e até mesmo a mineralogia podem influenciar no fator de intensidade da análise por Fluorescência de Raios-X. Para que seja possível obter o melhor da capacidade analítica do equipamento uma boa preparação, adequada ao tipo de amostra e a finalidade a que se propõe a análise, é extremamente necessária [3].

### 3. MATERIAIS E MÉTODOS

#### Metodologia para Determinação do Equipamento

Para balizar a tomada de decisão na escolha do equipamento, foram tomadas algumas amostras com teores conhecidos e analisadas com o equipamento de Fluorescência de Raios X Portátil, modelo S1 TITAN 600, fabricante BRUKER (figura 08). Os testes foram realizados em parceria com a empresa Essencis Technologies, representante do equipamento no Brasil.



**Figura 08** – FRX Portátil modelo S1 TITAN 600 [3]

Suas principais características são:

- Equipamento portátil (1,5kg);
- Permite análise de Magnésio (massa atômica: 24,3u) a Urânio (massa atômica: 238u);
- Tubo de raio-X de 4watt;
- Detector em silício com área de 20mm<sup>2</sup>;
- Pode ser utilizado conectado à rede elétrica, sem a necessidade de UPS, ou com bateria;
- Blindado contra radiação e ambientes agressivos;

- Feixe colimado para análise pontual com diâmetro de 5 mm e sistema de imagem com câmera para visualização;

O equipamento foi inicialmente calibrado com o padrão “GeoMining”, (padrão para análise de minérios e materiais geológicos, que permite a quantificação de 48 elementos).

As amostras secas de concentrados (com tamanho menor que 2,0mm), foram analisadas brutas, sem pulverização e conseqüente homogeneização granulométrica, com o intuito de simular a utilização do equipamento dentro do processo produtivo para obtenção de resultados rápidos (figura 09).



**Figura 09** – Representação das Amostras Analisadas no Teste Inicial [3].

As amostras foram dispostas em cubetas com filme de 4 $\mu$ m, até a metade de sua capacidade. Mediante a alguns resultados já conhecidos de 04 de amostras aleatórias, foram calculadas a inclinação e interceptação para geração da equação de ajuste da calibração GeoMining. Com essa calibração a equação gerou um coeficiente de correlação de  $R=0,92$  entre os resultados analisados com o FRX-P (padrão GeoMining) e os resultados das amostras de resultados conhecidos (Tabela I).

**Tabela I** – Resultados das Análises Iniciais com FRX-P (%Fe – Padrão GeoMining)

<i>Elemento Analisado</i>		Fe	
<i>Inclinação</i>		0,3232	
<i>Interceptação</i>		46,2818	
<i>R Após Correção</i>		0,9132	
<i>Amostra</i>	<i>Resultados Conhecidos</i>	<i>Resultados Analisados (Padrão GeoMining)</i>	<i>Resultados Corrigidos</i>
1	59,21	42,24	59,93
2	61,00	42,53	60,03
3	62,58	54	63,73
4	65,58	56,9	64,67

Fonte: Arquivo Interno, 2021

Uma das amostras, foi escolhida aleatoriamente e analisada 11 vezes para a demonstração da repetibilidade e precisão do equipamento (tabela II).

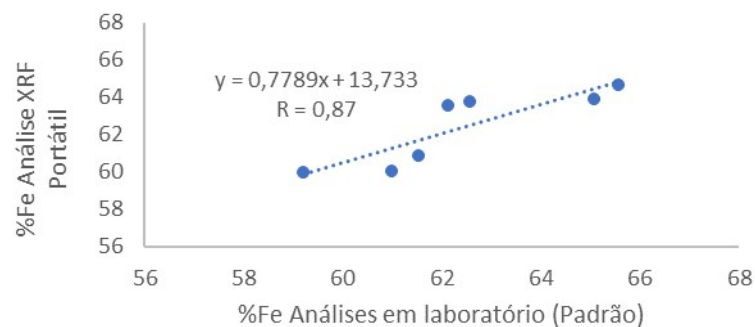
**Tabela II** – Resultados de Repetibilidade das Análises (%Fe)

<i>Análise</i>	<i>%Fe GeoMining</i>	<i>% Fe Corrigido</i>
1	54,42	63,87
2	54,27	63,82
3	54,50	63,90
4	54,40	63,86
5	54,32	63,84
6	54,35	63,85
7	54,02	63,74
8	54,13	63,78
9	54,09	63,76
10	54,13	63,78
11	54,26	63,82
<b>Média</b>	<b>54,26</b>	<b>63,82</b>
<b>Desvpad</b>	<b>0,153</b>	<b>0,050</b>

Fonte: Arquivo Interno, 2021

A média e desvio padrão das análises da amostra que foi analisada, mostra que o equipamento foi preciso e apto para desempenhar as análises das amostras.

Após a calibração, foram realizadas análises em novas amostras e os resultados ficaram muito próximos aos das amostras analisadas em laboratório. Nesse teste foi possível gerar um coeficiente de correlação de  $R=0,87$  entre as amostras de resultados conhecidos versus as analisadas pelo FRX-P (figura 10). Ressaltando que para esse primeiro, foram analisadas as amostras, sem a pulverização e prensamento.



**Figura 10** – Teor de Fe em Amostras Analisadas em Laboratório x Teor de Fe em Amostras Analisadas com FRX Portátil. (Elaborado pelo autor)

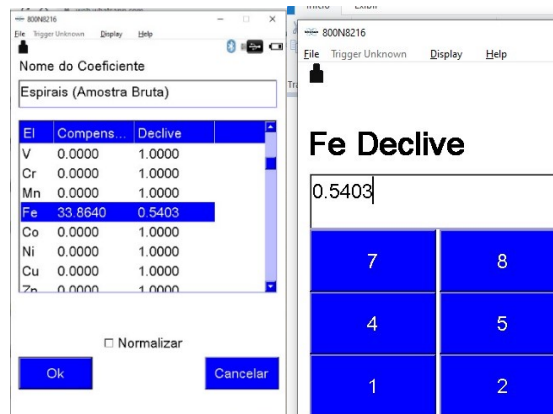
## Metodologia para Calibração do Equipamento

Após a validação do equipamento a ser utilizado, se iniciaram as análises para calibração e geração dos fatores de correlação e correção para serem imputados em seu sistema.

Inicialmente foram realizadas análises de amostras brutas de concentrados das espirais (sem pulverização) com resultados já conhecidas, buscadas no arquivo do laboratório químico da empresa. Para essas análises, as amostras foram somente quarteadas, para geração de volume equivalente ao recipiente (cubeta) a ser inserida no equipamento.

Para cada amostra analisada, foram lançados os valores dos elementos principais (Fe e SiO<sub>2</sub>) em uma planilha (*Microsoft Office Excel*®), juntamente com os valores dos resultados já conhecidos, de modo a gerar os fatores de correção (inclinação e interceptação das equações).

Após a geração dos valores de correção, foram imputados no equipamento de modo a realizar a correção e geração da informação automática. A figura 11 exemplifica o lançamento dos fatores no módulo de calibração do equipamento.



**Figura 11** – Exemplo de Inserção de Fator de Correção no Equipamento FRX-P (Arquivo Interno, 2021)

Os resultados de correlação entre as amostras analisadas pelo FRX-P e resultados do laboratório, apresentaram valores de  $R=0,81$  para o Fe e  $0,87$  para SiO<sub>2</sub>. A tabela III, mostra os resultados obtidos das análises, comparados aos resultados já conhecidos.

**Tabela III – Comparação dos Resultados do Analisador FRX-P versus Resultados do Laboratório (Amostras Brutas).**

<i>Elemento Analisado</i>				<i>Elemento Analisado</i>			
Fe				SiO <sub>2</sub>			
<i>Inclinação</i>				<i>Inclinação</i>			
<i>Interceptação</i>				<i>Interceptação</i>			
<i>R Após Correção</i>				<i>R Após Correção</i>			
<i>Amostra</i>	<i>Resultados Conhecidos</i>	<i>Resultados Analisados (Padrão GeoMining)</i>	<i>Resultados Corrigidos</i>	<i>Amostra</i>	<i>Resultados Conhecidos</i>	<i>Resultados Analisados (Padrão GeoMining)</i>	<i>Resultados Corrigidos</i>
1	64,39	55,854	64,04	1	11,72	16,273	9,61
2	63,12	53,395	62,71	2	5,65	6,392	4,77
3	62,47	53,106	62,56	3	6,23	10,012	6,54
4	59,87	48,612	60,13	4	5,49	9,931	6,50
5	60,8	53,408	62,72	5	4,53	5,965	4,56
6	63,95	54,763	63,45	6	5,32	9,386	6,24
7	60,35	53,21	62,61	7	6,94	8,566	5,84
8	61,64	52,999	62,50	8	4,13	6,847	4,99
9	63,19	52,936	62,46	9	6,06	8,244	5,68
10	61,73	52,079	62,00	10	7,92	8,551	5,83
11	67,48	58,162	65,29	11	2,96	4,756	3,97
12	65,37	55,759	63,99	12	3,04	5,119	4,15
13	64,2	57,259	64,80	13	6,05	6,424	4,79
14	63,6	58,337	65,38	14	6,78	6,113	4,63
15	65,4	59,217	65,86	15	5,09	6,924	5,03
16	63,6	54,301	63,20	16	7,43	13,929	8,46
17	64,7	56,956	64,64	17	5,02	8,021	5,57
18	64,6	56,769	64,53	18	4,58	8,318	5,71
19	61,5	50,313	61,05	19	9,67	19,448	11,17
20	65,4	56,718	64,51	20	3,86	5,306	4,24
21	64,5	56,24	64,25	21	4,86	5,689	4,43
22	65,4	56,622	64,46	22	5,09	7,758	5,44
23	66,5	59,569	66,05	23	2,93	4,605	3,90
24	65,37	56,706	64,50	24	4,9	7,392	5,26
25	63,19	53,156	62,58	25	7,72	13,769	8,39
26	65,01	57,369	64,86	26	5,7	8,114	5,61
27	65,67	57,2	64,77	27	4,9	8,153	5,63
28	67,48	60,012	66,29	28	2,42	3,301	3,26
29	64,23	55,095	63,63	29	6,93	12,107	7,57
30	63,22	58,236	65,33	30	6,72	5,797	4,48
31	64,39	57,831	65,11	31	5,45	8,008	5,56
32	63,57	53,342	62,68	32	6,24	10,96	7,01
33	62,47	52,415	62,18	33	8,88	14,912	8,95
34	63,09	53,043	62,52	34	6,6	11,107	7,08
35	60,35	54,231	63,16	35	11,17	14,448	8,72
36	61,64	49,61	60,67	36	9,58	17,123	10,03
37	60,8	51,193	61,52	37	10,96	16,438	9,69
38	63,12	51,426	61,65	38	7,93	15,42	9,19
39	63,95	57,815	65,10	39	7,26	10,339	6,70
40	61,73	54,504	63,31	40	8,18	12,362	7,70

Fonte: Elaborado pelo Autor

Para melhor ajuste, aumento da correlação e maior assertividade dos resultados do analisador FRX-P, foi realizada nova calibração, desta vez realizando a pulverização da alíquota da amostra a ser analisada, assim minimizando o efeito da heterogeneidade

granulométrica e mineralógica. As análises foram realizadas sem formação de pastilha (prensagem) da amostra na cubeta, ou seja, as análises foram realizadas em “pó solto”.

A partir da nova calibração, os valores de correção melhoraram significativamente, onde o coeficiente de correlação para o teor de Fe foi de  $R=0,996$  e para o teor de  $SiO_2$  de  $R=0,997$ , conforme demonstrado na tabela IV.

**Tabela IV** – Comparação dos Resultados do Analisador FRX-P versus Resultados do Laboratório (Amostras Pulverizadas).

<i>Elemento Analisado</i>				<i>Elemento Analisado</i>			
Fe				SiO <sub>2</sub>			
<i>Inclinação</i>				<i>Inclinação</i>			
0,9765				0,8263			
<i>Interceptação</i>				<i>Interceptação</i>			
6,5939				-0,8385			
<i>R Após Correção</i>				<i>R Após Correção</i>			
0,9960				0,9968			

<i>Amostra</i>	<i>Resultados Conhecidos</i>	<i>Resultados Analisados (Padrão GeoMining)</i>	<i>Resultados Corrigidos</i>	<i>Amostra</i>	<i>Resultados Conhecidos</i>	<i>Resultados Analisados (Padrão GeoMining)</i>	<i>Resultados Corrigidos</i>
1	64,76	59,484	64,68	1	5,21	6,799	4,78
2	60,66	54,822	60,13	2	10,48	13,955	10,69
3	62,09	56,875	62,13	3	7,91	10,587	7,91
4	63,18	57,955	63,19	4	6,97	9,234	6,79
5	65,63	60,735	65,90	5	4,31	6,904	4,87
6	62,11	56,675	61,94	6	8,95	11,461	8,63
7	59,67	54,563	59,88	7	12,11	15,89	12,29
8	56,37	51,214	56,61	8	16,32	20,619	16,20
9	62,64	57,529	62,77	9	7,6	10,337	7,70
10	64,26	58,922	64,13	10	6,24	8,559	6,23

Fonte: Elaborado pelo Autor

### Metodologia para Execução da Rotina de Análises

A rotina executada para amostragens e análises dos concentrados das espirais se dava com a coleta horária de incrementos para composição de uma amostra final do turno (9 horas) com a liberação do resultado após aproximadamente 3 horas do fechamento da amostra. Ou seja, os resultados dos concentrados oficiais, são conhecidos após aproximadamente 11 horas do início do turno. Também eram coletados incrementos para composição de uma amostra intermediária (4 horas após o início do turno), com resultados liberados após 2 horas. A equipe operacional obtém conhecimento dos resultados das amostras analisadas pelo laboratório físico-químico a cada 6 horas, aproximadamente.

Após a calibração do equipamento FRX-P e confiabilidade dos resultados de suas análises, foi criada uma rotina para inserção de sua utilização de modo a realizar o controle de processos mais apurados dentro da operação unitária de concentração por espirais.

A cada hora, são coletadas alíquotas de amostras na descarga do transportador de correias de produto das espirais. São realizados 3 incrementos e dispostos em 3 recipientes diferentes, onde:

- Incremento I: Composição da amostra com encerramento a cada duas horas para controle de processos, sendo encaminhada para preparação e análise com o FRX-P;
- Incremento II: Composição da amostra intermediária (metade do turno), representando a amostra parcial do turno, sendo enviada para o laboratório físico-químico para realização de análises;
- Incremento III: Composição da amostra final do turno, representando a qualidade total da produção executada no turno, sendo enviada para o laboratório físico-químico para realização de análises;

A figura 12, mostra a forma de coleta dos incrementos das amostras na descarga do transportador de correias de produto da concentração por espirais



**Figura 12** – Representação da Coleta dos Incrementos das Amostras de Produto da Concentração por espirais (Arquivo Interno, 2022).

Após a composição das amostras de controle de processo, a massa coletada (aproximadamente quatro quilos) é homogeneizada e quarteada em bancada. A amostra é homogeneizada pelo método de pilha cônica, onde o material é revolvido por quatro vezes, dispondo os tombamentos sempre na parte central do cone, em seguida o topo do cone é achatado e o material dividido (quarteado) em quatro porções (figura 13). Os dois setores em diagonal são reunidos novamente, realizando novo procedimento de homogeneização e quarteamento, dessa forma, aproximadamente 25% da amostra inicial (em torno de um quilo)



é encaminhada para secagem em chapa térmica a 105°C por no mínimo 40 minutos (figura 14). O restante da amostra é acondicionado até o final do procedimento das análises, posteriormente é descartada.

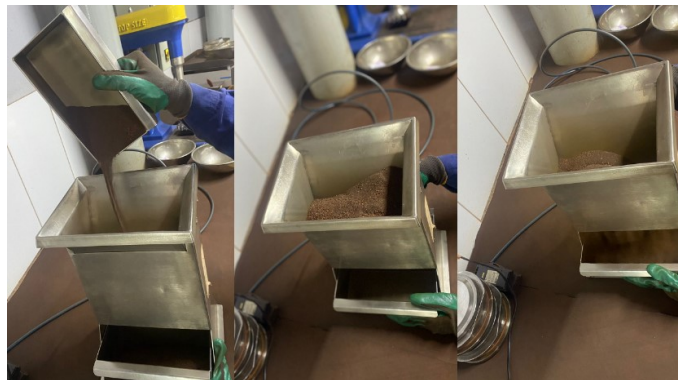


**Figura 13** – Representação da Primeira Fase de Homogeneização e Quarteamento das Amostras de Produto da Concentração por espirais (Arquivo Interno, 2022).



**Figura 14** – Representação da Disposição da Amostra em Chapa Térmica para Secagem (Arquivo Interno, 2022).

Após seca, a amostra é retirada da chapa, fica em repouso por cinco minutos para esfriar e posteriormente é homogeneizada e dividida novamente no quarteador tipo rifles, até a obtenção da massa de 80 a 100g (figura 15).



**Figura 15** – Representação da Homogeneização e Quarteamento da Amostra Seca em Divisor Rifles (Arquivo Interno, 2022).

Posteriormente a amostra é encaminhada ao pulverizador (moinho de panelas), sendo processada durante 3 minutos (figura 16).



**Figura 16** – Representação da Amostra Sendo Pulverizada em Moinho de Panelas (Arquivo Interno, 2022).

A amostra pulverizada, em seguida é acondicionada em cubeta com filme de 4 $\mu$ m com e encaminhada para análise no FRX-P (figura 17). O equipamento leva em torno de um minuto para realizar a análise.



**Figura 17** – Representação da Amostra Sendo Analisada no FRX-P (Arquivo Interno, 2022).

Após concluída a análise (figura 18), os dados são lançados em uma planilha utilizando o *Microsoft Office Excel*®, que gera um relatório com os resultados a cada 02 horas, simulando também o fechamento do turno (figura 19). Esses resultados são disponibilizados para a equipe operacional, que conforme as qualidades geradas, executam ações de ajustes na operação unitária de concentração por espirais, de modo a buscar a estabilização da qualidade.

El	%	+/- [*2]
Fe	64.35	0.08
SiO2	5.21	0.18
Al2O3	1.26	0.16
P	0.05	0.01
Mn	0.01	0.00
Cr	0.03	0.01

Espectro

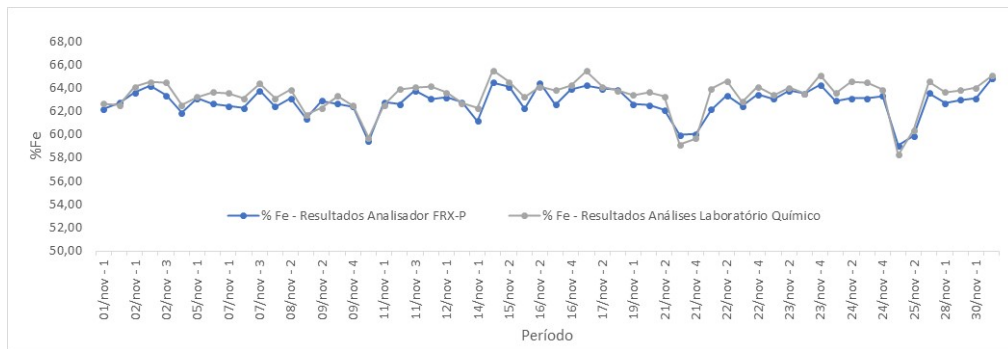
**Figura 18** – Representação dos Resultados das Análises do FRX-P (Arquivo Interno, 2022).



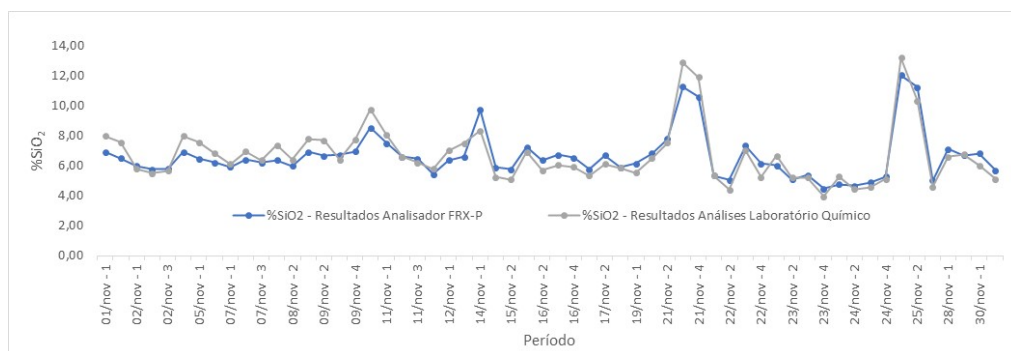
**Figura 19** – Representação da Divulgação dos Resultados das Análises do FRX-P Durante o Turno (Arquivo Interno, 2022).

#### 4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

As figuras 20 e 21, apresentam os resultados dos teores de Fe e SiO<sub>2</sub>, das análises realizadas pelo FRX-P (ponderadas para o fechamento dos resultados dos turnos), comparadas com os resultados divulgados das análises do laboratório físico-químico no período de um mês. Os resultados apresentam grande coerência e proximidade entre os dois métodos de análises, onde a diferença relativa média para os teores de Fe é de 0,89% e para os teores de SiO<sub>2</sub> de 1,06%.



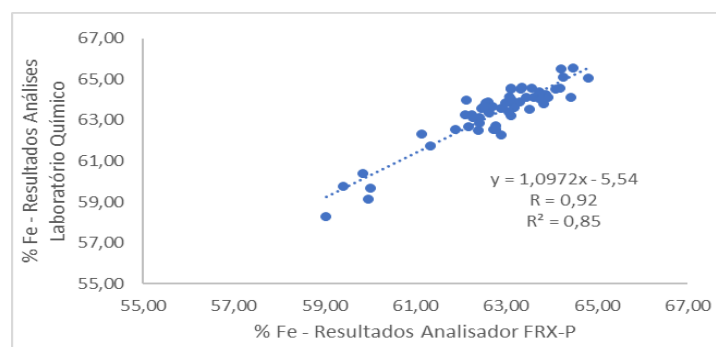
**Figura 20** – Comparação Dos Teores de Fe entre Resultados do Analisador FRX-P e Resultados do Laboratório (Elaborado pelo Autor)



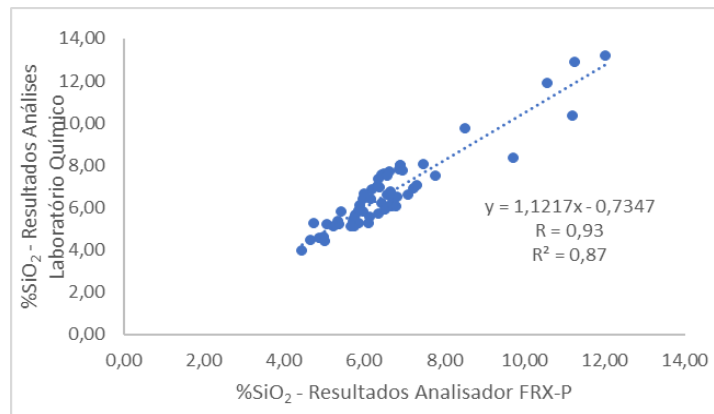
**Figura 21** – Comparação Dos Teores de SiO<sub>2</sub> entre Resultados do Analisador FRX-P e Resultados do Laboratório (Elaborado pelo Autor)

As médias de teores de ferro e sílica nos resultados do analisador FRX-P foram de 62,8% e 6,62% respectivamente, enquanto os resultados gerados pelo laboratório foram de 63,3% para o ferro e 6,7% para sílica.

Os teores de Fe e de SiO<sub>2</sub> dos resultados das análises realizadas pelo FRX-P e do laboratório físico-químico apresentam alta correlação. Os coeficientes de correlação (R) para o teor de Fe foi de R=0,92, enquanto para o teor de SiO<sub>2</sub> foi de R=0,93. Conforme mostrado nas figuras 22 e 23.



**Figura 22** – Correlação Entre Teores de Fe dos Resultados do FRX-P e Resultados do Laboratório (Elaborado pelo Autor)



**Figura 23** – Correlação Entre Teores de SiO<sub>2</sub> dos Resultados do FRX-P e Resultados do Laboratório  
(Elaborado pelo Autor)

Comparando a estatística descritiva dos resultados de qualidade dos concentrados das espirais (período de 31 dias) antes da utilização do FRX-P com os resultados de um período após a utilização do FRX-P (30 dias), conseguimos observar que a variabilidade das amostras diminuiu significativamente (tabela V), onde o desvio padrão caiu de 1,3 para 0,9 (29% menor) para o teor de Fe e para o teor de SiO<sub>2</sub>, diminuiu de 1,5 para 1,4 (7% menor). A variância caiu de 1,7 para 0,9 para o teor de Fe (50%) e de 2,2 para 1,9 para o teor de SiO<sub>2</sub> (14%).

**Tabela V** – Comparação da Estatística Descritiva dos Resultados de Qualidade de Um Período Antes da Utilização do FRX-P com um Período Após a Utilização do FRX-P

ESTATÍSTICA	ANTES UTILIZAÇÃO FRX-P		APÓS UTILIZAÇÃO FRX-P	
	%Fe	%SiO <sub>2</sub>	%Fe	%SiO <sub>2</sub>
Média	62,6	8,1	63,4	6,5
Erro padrão	0,2	0,3	0,2	0,3
Mediana	62,8	8,0	63,6	6,7
Desvio padrão	1,3	1,5	0,9	1,4
Variância da amostra	1,7	2,2	0,9	1,9
Curtose	0,8	0,7	0,6	-0,8
Assimetria	-0,5	0,3	-0,9	0,3
Intervalo	6,0	6,6	4,0	4,6
Mínimo	59,2	5,1	60,8	4,6
Máximo	65,2	11,6	64,8	9,2
Soma	1941,4	250,6	1901,9	195,8
Contagem	31,0	31,0	30,0	30,0

Fonte: Elaborado pelo Autor

A tabela VI traz os resultados dos ganhos apresentados no processo de concentração por espirais comparando um período trabalhando sem a utilização do FRX-P, com um período trabalhando com a utilização do instrumento. Foram observados os aumentos de 1,2% no teor de Fe do concentrado e diminuição de 19,3% no teor de SiO<sub>2</sub>. A recuperação em massa

aumentou 28%, enquanto a metálica aumentou 16%. A relação de enriquecimento caiu de 1,4 para 1,3 (menos 9%), em função da melhor qualidade da alimentação durante período de utilização do FRX-P, mas em contrapartida o índice de seletividade (Gaudin) aumentou de 2,7 para 2,8 (3%), mostrando maior eficiência no processo da operação unitária de concentração por espirais.

**Tabela VI** – Comparação dos Resultados dos Parâmetros de Processo da Etapa de Concentração por Espirais Antes e Após a Utilização do FRX-P

<i>PARÂMETRO</i>	<i>ANTES UTILIZAÇÃO FRX-P</i>	<i>APÓS UTILIZAÇÃO FRX-P</i>	<i>% GANHO</i>
Fe Concentrado (%)	62,6	63,4	1,2%
SiO <sub>2</sub> Concentrado (%)	8,1	6,5	-19,3%
Recuperação em Massa (%)	31,0	39,7	28,1%
Recuperação Metálica (%)	43,6	50,8	16,4%
Relação de Enriquecimento	1,4	1,3	-9,1%
Índice de Seletividade (Gaudin)	2,7	2,8	3,4%

Fonte: Elaborado pelo Autor

## 5. CONCLUSÕES

Os métodos de análises elementares por fluorescência de raios-X, se mostram como uma técnica de fácil aplicação e de baixo custo. É um método analítico não destrutivo, exige baixo consumo de reagentes e utensílios laboratoriais, gera pouco resíduo e a resposta de suas análises são rápidas, sendo vantajosa sua aplicação para análises de rotina para controle de processos.

O analisador de fluorescência de raios-X portátil (FRX-P) modelo S1 TITAN 600, apresentou grande precisão e coerência para realizar análises de amostras de rotina, visando maior controle de processo e ajuste de qualidade dos produtos das espirais concentradoras da planta de beneficiamento da Mineração Morro do Ipê.

A preparação das amostras é fator preponderante para geração de resultados mais precisos. A pulverização da amostra a ser analisada, garante maior homogeneidade granulométrica e mineralógica, desta forma seus resultados se tornam mais concisos. As análises das amostras pulverizadas sem a necessidade de prensamento (pó solto), necessitam de pouco tempo para preparação e geram excelentes resultados, tornando as análises mais rápidas, propiciando mais efetividade nas tomadas de decisão para ajustes nas variáveis da operação unitária de concentração por espirais.



Observou-se a necessidade de melhor calibração e inserção de fatores de correção para os teores de Fe, visto que os resultados do analisador FRX-P (para a calibração executada), apresentam em torno de 0,9% menos (média do erro absoluto), comparando com os resultados do laboratório.

Os ganhos com o controle de processo utilizando o FRX-P para verificação rápida das qualidades dos concentrados das espirais foram nitidamente observados, onde o aumento da recuperação em massa, melhora e estabilidade da qualidade do concentrado, trouxeram maior confiabilidade para a operação unitária. Outro ponto importante, é que, para inserir a rotina de amostragens, preparação e análises efetiva da qualidade dos concentrados com a utilização do FRX-P, não foi necessário mão-de-obra operacional adicional, os operadores foram treinados e capacitados para realizar as análises, intercalando entre suas atividades rotineiras.

A previsibilidade da qualidade das amostras dos concentrados, propiciam as tomadas de decisões para as necessidades de ajustes das variáveis operacionais para correção dos teores ou possibilidade de ganho em massa ao longo dos turnos.

Como próximos passos serão construídos padrões para análises dos teores da alimentação do circuito de concentração por espirais, de modo a correlacionar a qualidade desse fluxo com os ajustes das variáveis de processo e operacionais. Dessa forma será possível trabalhar de forma antecipada, buscando melhorar ainda mais a estabilidade da qualidade dos concentrados.

## 5. REFERÊNCIAS

- [1] ALEXANDRE T.L.; BUENO, M.I.M.S. Classification of some species, genera and families of plants by x-ray spectrometry. *X-ray spectrometry*, v. 35, n.4, p. 257- 260, 2006.
- [2] ARENARE, D.S.; RODRIGUES, O.M.S., ARAÚJO, A.C., VIANA, P.R.M. Espirais concentradoras no tratamento de minérios de ferro: uma breve revisão, *Tecnol. Metal. Mater.*, abr.-jun, 2009, v. 5, n. 4, São Paulo, p. 224-228.
- [3] ESSENCIS TECHNOLOGIES. Relatório Técnico de Aplicação S1 TITAN - Mineração IPÊ. São Paulo, 2020
- [4] HOLLAND-BATT, A.B. Some design considerations for spiral separators. *Minerals Engineering*, v. 8, n. 11, p. 1381-1395, Nov. 1995.

- [5] INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY. Industrial and environmental applications of nuclear analytical techniques. Vienna: IAEA, 1999.
- [6] LINS, F.A.F. Comunicação Técnica elaborada para a 4ª Edição do Livro de Tratamento de Minérios, p. 241 a 268, Dez. 2004.
- [7] MELO JÚNIOR, A. S. Análise quantitativa do material particulado na região de campinas através das técnicas de microfluorescência de raios-X e reflexão total usando radiação síncrotron. Tese (Doutorado em Química) - Unicamp, Campinas, São Paulo, 2007.
- [8] MINERAL TECHNOLOGIES. HC33 High-Capacity Spiral Separator. TECHNICAL DATA. Queensland, Australia, 2012.
- [9] NAGATA, N.; BUENO, M. I. M. S.; PERALTA-ZAMORA, P. G. Métodos Matemáticos para Correção de Interferências Espectrais e Efeitos Interelementos na Análise Quantitativa por Fluorescência de Raios-X. Química Nova, v. 24, n. 4, p. 531-539, 2001.
- [10] PATACA, L. C. M.; BORTOLETO, G. G.; BUENO, M. I. M. S. Determinação de arsênio em águas contaminadas usando fluorescência de raios-x por Energia dispersiva. Química Nova, v. 28, n. 4, p. 579-582, 2005.
- [11] SAMPAIO, C. H.; TAVARES, L. M. Beneficiamento Gravimétrico. Porto Alegre: Editora da UFRGS, 2005
- [12] SANTOS, E.S.; GAMA, E.M.; FRANÇA, R.S.; SOUZA, A.S.; MATOS, R.P. Espectrometria de Fluorescência de Raios-X na Determinação de Espécies Químicas. Enciclopédia Biosfera, Centro Científico Conhecer, Goiânia, V.9, n.17; p. 3413, 2013.
- [13] SKOOG, D.A.; HOLLER, F.J.; NIEMAN, T. A. Princípios de Análise Instrumental, 5ª ed. Porto Alegre: Bookman, p. 31-36; p. 317-342, 2009.
- [14] WILLS, B.A., NAPIER-MUNN, T.J. Gravity concentration In: Wills' Mineral processing technology - An Introduction to the Practical Aspects of Ore Treatment and Mineral, 7. ed., Elsevier Science & Technology Books, October 2006. p. 236-238.