

## **PROGRAMA COMPUTACIONAL PARA DIMENSIONAMENTO DE EQUIPAMENTOS EM USINAS DE PEQUENO PORTE**

**DUARTE, E.A.C.<sup>1</sup>, SANTOS, R.C.P.<sup>2</sup>, PEREIRA, P.E.C.<sup>3</sup>**

<sup>1</sup>Universidade Federal de Goiás (UFG), Regional Catalão, Unidade Acadêmica Especial de Engenharia. email: eduardoantonio765@gmail.com

<sup>2</sup>Universidade Federal de Goiás (UFG), Regional Catalão, Unidade Acadêmica Especial de Engenharia. email: rita.pedrosa@ufg.br

<sup>3</sup>Universidade Federal de Goiás (UFG), Regional Catalão, Unidade Acadêmica Especial de Engenharia. email: paulo\_elias\_carneiro@ufg.br

### **RESUMO**

O adequado dimensionamento dos equipamentos em usinas de processamento mineral é de extrema importância para se alcançar a meta de produção estabelecida, com custos operacionais e patamares de qualidade de acordo com o previsto pelo projeto. Tais questões se tornam ainda mais importantes em empreendimentos mineiros de pequeno porte, essencialmente devido a limitações de recursos (econômicos, técnicos e humanos). Este trabalho apresenta um programa computacional elaborado a partir da plataforma Visual Studio, no qual é utilizado um algoritmo que se baseia em métodos e equações de dimensionamento, que possibilita, através de uma interface simples, dimensionar britadores de mandíbulas, peneiras vibratórias inclinadas, moinhos de bolas e de barras. A partir de buscas por fabricante e geração de relatórios, permite uma análise rápida e interativa de diferentes opções.

**PALAVRAS-CHAVE:** algoritmo; programa computacional; dimensionamento; pequeno porte.

### **ABSTRACT**

The proper sizing of the equipment in mineral processing plants is of extreme importance in order to reach the established production goal, with operating costs and levels of quality according to the predicted by the project. Such issues become even more important in small-scale mining enterprises, essentially due to resource constraints (economic, technical and human). The work presents a computational program built from the Visual Studio platform, in which is used an algorithm based on methods and equations of equipment sizing. This software enables, through a simple interface, the dimensioning of jaw crushers, inclined vibrating screens, ball and bars mills. From searches by manufacturer and reporting, allows a quick and interactive analysis of different options.

**KEYWORDS:** algorithm; computational program; sizing; small-scale.

## **1. INTRODUÇÃO**

O processamento mineral corresponde a um conjunto de operações cujo propósito geral é separar os minerais valiosos dos minerais de ganga, resultando em um

aumento do teor desses, representando, portanto, um processo de enriquecimento, de tal forma a tornar o material resultante, geralmente denominado “concentrado”, adequado para transporte e/ou refino posterior (WILLS; NAPIER-MUNN, 2006).

O projeto de usinas de processamento mineral envolve uma série de procedimentos, interdependentes entre, dos quais tem-se: definição do fluxograma adequado; escolha e dimensionamento dos equipamentos utilizados em cada operação unitária; otimização da operação da usina, de tal forma a obter a maior eficiência possível das operações, e; identificação de dificuldades potenciais durante a operação (LUZ; SAMPAIO; ALMEIDA, 2004). Tais procedimentos impactam diretamente no alcance das metas estabelecidas para o processamento (teores, recuperações mássica e metalúrgica, e custos operacionais).

O dimensionamento dos equipamentos é uma etapa fundamental no projeto de usinas, a partir da qual serão embasadas as demais etapas, e será um fator determinante no cumprimento das exigências de qualidade do produto final. Torna-se necessário, portanto, um correto dimensionamento dos equipamentos industriais, seguido da organização adequada das operações unitárias na forma de fluxograma - rota de processo.

A escolha e o dimensionamento de equipamentos de processamento mineral em usinas de pequeno porte podem ser dificultados por falta de informações e/ou ferramentas computacionais, o que torna a atividade baseada estritamente em procedimentos empíricos. Portanto, é importante a utilização, por parte dessas organizações, de ferramentas para se proceder com o dimensionamento de maneira confiável e rápida, e que permita a avaliação de alternativas entre equipamentos.

O trabalho apresenta um programa computacional para dimensionamento de britadores de mandíbulas, peneiras vibratórias inclinadas e moinhos de bolas e de barras, elaborado a partir da plataforma Visual Studio. Os procedimentos de cálculo do dimensionamento são embasados nos métodos e equações relacionados aos respectivos equipamentos, formulados a partir de trabalhos anteriores, tais como os de Taggart (1951), Bond (1958, 1961), dentre outros.

O programa elaborado permite o dimensionamento por meio de uma interface simples, de fácil entendimento, em que o usuário insere os parâmetros de dimensionamento e as características do material e do processo de forma objetiva, resultando, então, no dimensionamento do respectivo equipamento. Além disso, o programa possibilita, a partir dos resultados, uma pesquisa interativa ao fabricante do equipamento. Por fim, é possível ainda obter relatórios sobre os resultados alcançados.

## **2. MATERIAL E MÉTODOS**

Os procedimentos para a elaboração do programa tiveram início com uma revisão dos conceitos e métodos relacionados ao dimensionamento de equipamentos de usinas de processamento mineral, especialmente aqueles atribuídos a britadores, peneiras vibratórias inclinadas e moinhos de bolas e de barras, cujas equações de dimensionamento foram programadas em linguagem vb.net, referente à plataforma Visual Studio.

A partir das equações, para cada equipamento, foi elaborado um módulo, com uma interface característica e adequada a cada um. Assim, foram elaborados três módulos: (i) britadores de mandíbulas; (ii) peneiras vibratórias inclinadas, e; (iii) moinhos de bolas e de barras.

## **2.1. Construção da Interface para Britadores de Mandíbulas**

Para o dimensionamento de britadores foi adotado o método de Taggart (TAGGART, 1951), segundo o qual a capacidade do britador é definida por meio da dimensão da boca de alimentação (gape) e da abertura da descarga. Taggart (1951) estabeleceu que a capacidade do britador (t/h) pode ser calculada através de dois parâmetros: (i) comprimento da boca de alimentação paralela à mandíbula fixa (cm), e; (ii) afastamento máximo da abertura de descarga (cm).

As equações necessárias ao dimensionamento, extraídas de Taggart (1951) e Teixeira (2013), foram programadas na plataforma Visual Studio, e em seguida, foram inseridas as variáveis de entrada, tais como: tamanho da maior partícula na alimentação,  $P_{80}$ ,  $F_{80}$ , e as características do material a ser submetido à britagem.

De posse dessas informações, foram programados então, os resultados relacionados às dimensões do britador, os quais são caracterizados pelos seguintes parâmetros: altura vertical, largura das mandíbulas, deslocamento e consumo de energia. Tais variáveis foram determinadas conforme as relações dadas por Gupta e Yan (2006). Por fim, foi programado um ambiente com o propósito de geração de relatórios contendo os resultados do dimensionamento.

## **2.2. Construção da Interface para Peneiras Vibratórias Inclinadas**

Para a elaboração do módulo de peneiras vibratórias inclinadas foi utilizado o método baseado na quantidade de material que passa através da malha de  $0,0929 \text{ m}^2$  (MULAR; BHAPPU, 1980), o qual, segundo Luz, Sampaio e Almeida (2004), é um dos métodos mais aceitos para o dimensionamento de peneiras.

O método estabelecido para o dimensionamento se baseia na determinação da área total da peneira, a qual depende, dos seguintes parâmetros: (i) quantidade de material na alimentação que atravessa a peneira; (ii) capacidade básica ou específica de peneiramento; (iii) densidade aparente do material alimentado, e; (iv) fatores modificadores. Tais relações e parâmetros podem ser encontrados em Mular e Bhappu (1980) e Luz, Sampaio e Almeida (2004), os quais descrevem os procedimentos matemáticos para o dimensionamento de peneiras.

As informações referentes aos fatores modificadores, constantes em Luz, Sampaio e Almeida (2004), também foram inseridas no programa, de tal forma a permitir uma busca interativa dos valores dos fatores, de acordo com as condições operacionais.

Após a introdução das informações anteriores ao programa, foram adicionadas também as equações referentes ao dimensionamento do sistema de lavagem da peneira, determinando-se quantidade de tubos e bicos e vazão da água de lavagem.

### 2.3. Construção da Interface para Moinhos de Bolas e de Barras

No procedimento de criação do módulo para dimensionamento de moinhos de bolas e de barras inicialmente foi necessário definir o modelo a ser utilizado para o dimensionamento, não excluindo a possibilidade de adição de mais um modelo futuramente. Para este caso, foi selecionado o Modelo de Bond (BOND, 1958, 1961), também conhecido como “Terceira Lei da Cominuição” (OLIVEIRA, 2012).

Neste método, o parâmetro fundamental para o dimensionamento é o índice de trabalho (*work index*), o qual está relacionado à resistência do material, e é fundamental para a determinação do trabalho necessário para a fragmentação. Neste caso, o trabalho necessário é uma função do índice de trabalho, e dos tamanhos das partículas da alimentação e do produto (BOND, 1958, 1961). Tais parâmetros, somente, não descrevem corretamente a operação da moagem. Portanto, foram adicionados ainda os fatores de correção, no total de 8, cada um atribuído a uma determinada característica operacional.

O modelo matemático resultante foi então incorporado ao programa, além de tabelas relativas às dimensões e características dos respectivos equipamentos. Estas informações permitem obter, além da potência necessária, as dimensões do moinho, tamanho dos corpos moedores, velocidade de operação e espessura do revestimento.

## 3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

### 3.1. Programa e Características

A programação dos parâmetros de dimensionamento para britadores de mandíbulas, peneiras inclinadas e moinhos de bolas e de barras, descritos na seção anterior, resultou na geração de quatro interfaces, cada uma atribuída a um equipamento, acessadas por meio de um menu na extremidade superior. A Figura 1 mostra as interfaces obtidas, onde é possível inserir os parâmetros e, então, obter os resultados dos respectivos dimensionamentos.

Na Figura 1 é possível observar que os parâmetros podem ser facilmente inseridos por meio de objetos, tais como *ComboBoxes*, *CheckBoxes*, *RadioButtons* e *TextBoxs*, o que facilita a compreensão e inserção das informações e características operacionais.

Os resultados dos dimensionamentos, particularmente do britador de mandíbula e da peneira inclinada, podem ser comparados aos equipamentos dos fabricantes, de forma a facilitar a definição dos modelos mais adequados. Ainda, é possível organizar os resultados na forma de relatórios, apropriados a cada equipamento, o que permite a visualização fácil, rápida e intuitiva das dimensões de cada um. A Figura 2 mostra exemplos de relatórios fornecidos pelo programa.

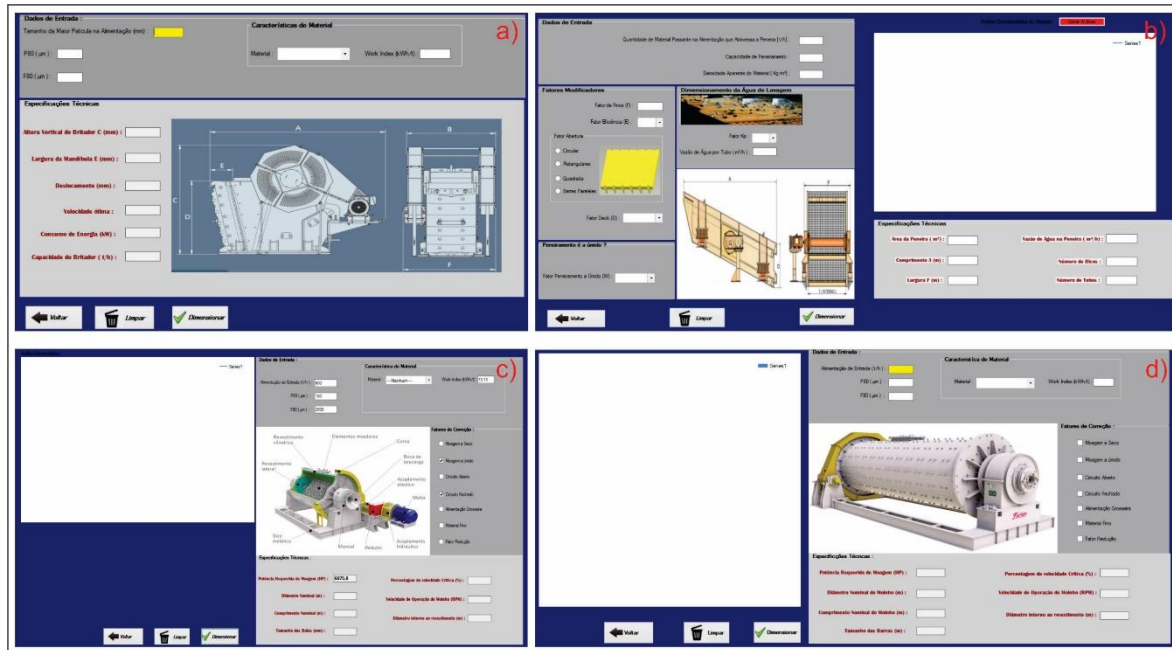


Figura 1. Interfaces para dimensionamento de britadores de mandíbulas (a), peneiras vibratórias inclinadas (b), e moinhos de bolas (c) e de barras (d)

| Visual D (Relatório de Dimensões Para Moinho de Bolas)  | Visual D Relatório de Dimensões Para Peneiras Vibratórias   |
|---|---|
| <ul style="list-style-type: none"> <li>• Potência Requerida de Moagem : 3037,9 hp</li> </ul>    | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Área da Peneira : 8 m<sup>2</sup></li> </ul>                       |
| <ul style="list-style-type: none"> <li>• Diâmetro Nominal do Moinho : 5.33 m</li> </ul>         | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Número de decks na Peneira : 1º Deque</li> </ul>                   |
| <ul style="list-style-type: none"> <li>• Comprimento Nominal do Moinho : 5.18m</li> </ul>       | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Comprimento da Peneira : 4 m</li> </ul>                            |
| <ul style="list-style-type: none"> <li>• Tamanho das Bolas: 75 mm</li> </ul>                    | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Largura da Peneira : 2 m</li> </ul>                                |
| <ul style="list-style-type: none"> <li>• Percentagem da Velocidade Crítica : 68.1 %</li> </ul>  | <p>Visual D Dimensões para Água de Lavagem</p>  |
| <ul style="list-style-type: none"> <li>• Velocidade de Operação do Moinho : 86,5 rpm</li> </ul> | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Número de Bicos : 7Unidades</li> </ul>                             |
| <ul style="list-style-type: none"> <li>• Diâmetro interno ao Revestimento : 5.0 mm</li> </ul>   | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Número de Tubos : 8 Unidades</li> </ul>                            |
|   | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Vazão de Água por Tubo Dimensionado : 8 m<sup>3</sup>/h</li> </ul> |

Figura 2. Exemplos de relatórios de resultados fornecidos pelo programa

### 3.2. Validação do Programa

Com o objetivo de verificar a funcionalidade do programa computacional desenvolvido, foram utilizados exercícios práticos de dimensionamento para os equipamentos em questão. As análises somente não foram realizadas para o módulo do britador de mandíbulas, em virtude da indisponibilidade de informações referentes à distribuição granulométrica da alimentação e o produto, necessárias para o dimensionamento pelo programa.

No caso da peneira vibratória inclinada, foi utilizado o primeiro exemplo mencionado em Luz, Sampaio e Almeida (2004, p. 231), onde foi considerada uma vazão do material passante de 195 t/h, densidade aparente de 2082 kg/m<sup>3</sup>, umidade de 8%, capacidade específica de 1,7 t/h, fator de finos de 33%, eficiência de 95%, peneiramento em 1 deque e malha retangular. Segundo os mesmos autores, a área da peneira seria de 8,74 m<sup>2</sup>, com 1,83 m de largura e 4,87 m de comprimento.

A utilização do programa computacional, nas mesmas condições, resultou nos valores expostos na Figura 3, onde é possível observar uma área de 8,8 m<sup>2</sup>, cujos comprimento e largura foram de 4,2 m e 2,1 m, respectivamente. Nota-se que os valores encontrados pelo programa estão próximos dos previstos pelo exemplo, com uma pequena diferença, atribuída à desigualdade entre a quantidade de casas decimais nos valores das áreas obtidos no exemplo consultado e no programa.

The screenshot shows a software interface for designing inclined vibrating screens. It is organized into several functional areas:

- Dados de Entrada (Input Data):** Fields for 'Quantidade de Material Passante na Alimentação que Atravessa a Peneira [t/h]' (195), 'Capacidade de Peneiramento' (1.7), and 'Densidade Aparente do Material [Kg/m³]' (2082).
- Fatores Modificadores (Modification Factors):** Fields for 'Fator de Finos (F)' (0.86), 'Fator Eficiência (E)' (95%), and 'Fator Abertura' (Circular, Retangulares, Quadrada, or Barras Paralelas). A 'Fator Deck (D)' is set to '19 Deque'.
- Dimensionamento da Água de Lavagem (Washing Water Sizing):** A field for 'Vazão de Água por Tubo (m³/h)' (3) and a 3D diagram of the screen structure.
- Especificações Técnicas (Technical Specifications):** A summary of results: 'Área da Peneira (m²)' (8.8), 'Comprimento A (m)' (4.2), 'Largura F (m)' (2.1), 'Vazão de Água na Peneira (m³/h)' (2), 'Número de Bicos' (8), and 'Número de Tubos' (1).

At the bottom, there are three buttons: 'Voltar' (Back), 'Limpar' (Clear), and 'Dimensionar' (Calculate).

Figura 3. Interface do dimensionamento de peneiras vibratórias inclinadas com os parâmetros obtidos no exemplo e os resultados encontrados pelo programa

Em relação ao dimensionamento de moinhos, foi considerado o exemplo discutido em Oliveira (2012, p. 49). Neste foram utilizados os seguintes parâmetros: dimensionamento de moinho de bolas em via úmida e circuito fechado; alimentação de 600 t/h de minério de cobre ( $W_i = 13,13$  kWh/st);  $F_{80}$  de 2.000  $\mu$ m, e;  $P_{80}$  de 180  $\mu$ m. De acordo com a autora, a potência requerida, considerando-se os fatores de correção, seria de 4.121 hp, de tal forma que seriam necessários dois moinhos de 2.060,5 hp para se obter a produção desejada.

O dimensionamento feito pelo programa (Figura 4) resultou em uma potência necessária, corrigida pelos fatores de moagem, de 4.416,7 hp, a qual é ligeiramente maior que o resultado encontrado no exemplo de Oliveira (2012). Nota-se ainda na Figura 4 que o programa não forneceu as dimensões do moinho, uma vez que o resultado encontrado é maior que a potência dos modelos comerciais disponíveis. Assim, as dimensões seriam referentes a um moinho de 2.208,35 hp, já que são necessários dois moinhos com esta especificação para atender a produção desejada (600 t/h).

| Section                    | Parameter                              | Value                               |
|----------------------------|--|-------------------------------------|
| Dados de Entrada           | Alimentação de Entrada (t/h)           | 600                                 |
|                            | P80 (µm)                               | 180                                 |
|                            | F80 (µm)                               | 2000                                |
| Característica do Material | Material                               | ---Nenhum---                        |
|                            | Work Index (kWh/t)                     | 13.13                               |
| Fatores de Correção        | Moagem a Seco                          | <input type="checkbox"/>            |
|                            | Moagem a Úmido                         | <input checked="" type="checkbox"/> |
|                            | Circuito Aberto                        | <input type="checkbox"/>            |
|                            | Circuito Fechado                       | <input checked="" type="checkbox"/> |
|                            | Alimentação Grosseira                  | <input checked="" type="checkbox"/> |
|                            | Material Fino                          | <input checked="" type="checkbox"/> |
|                            | Fator Redução                          | <input checked="" type="checkbox"/> |
| Especificações Técnicas    | Potência Requerida de Moagem (HP)      | 4416.7                              |
|                            | Dímetro Nominal (m)                    |                                     |
|                            | Comprimento Nominal (m)                |                                     |
|                            | Tamanho das Bolas (mm)                 |                                     |
|                            | Porcentagem da velocidade Crítica (%)  |                                     |
|                            | Velocidade de Operação do Moinho (RPM) |                                     |
|                            | Dímetro Interno ao revestimento (m)    |                                     |

Figura 4. Interface do dimensionamento do moinho de bolas mostrando os parâmetros e as condições operacionais e o resultado obtido para a produção de 600 t/h

Alterando o valor da produção para 300 t/h e mantendo as mesmas condições anteriores, o dimensionamento do programa resulta em uma potência de 2.208,4 hp (Figura 5), expondo, neste caso, as dimensões do moinho de bolas. Isto se deve ao fato de que um moinho com potência próxima a esta se encontra disponível comercialmente, e está no banco de dados do programa.

| Section                    | Parameter                              | Value                               |
|----------------------------|--|-------------------------------------|
| Dados de Entrada           | Alimentação de Entrada (t/h)           | 300                                 |
|                            | P80 (µm)                               | 180                                 |
|                            | F80 (µm)                               | 2000                                |
| Característica do Material | Material                               | ---Nenhum---                        |
|                            | Work Index (kWh/t)                     | 13.13                               |
| Fatores de Correção        | Moagem a Seco                          | <input type="checkbox"/>            |
|                            | Moagem a Úmido                         | <input checked="" type="checkbox"/> |
|                            | Circuito Aberto                        | <input type="checkbox"/>            |
|                            | Circuito Fechado                       | <input checked="" type="checkbox"/> |
|                            | Alimentação Grosseira                  | <input checked="" type="checkbox"/> |
|                            | Material Fino                          | <input checked="" type="checkbox"/> |
|                            | Fator Redução                          | <input checked="" type="checkbox"/> |
| Especificações Técnicas    | Potência Requerida de Moagem (HP)      | 2208.4                              |
|                            | Dímetro Nominal (m)                    | 4.88                                |
|                            | Comprimento Nominal (m)                | 4.88                                |
|                            | Tamanho das Bolas (mm)                 | 64                                  |
|                            | Porcentagem da velocidade Crítica (%)  | 68.9                                |
|                            | Velocidade de Operação do Moinho (RPM) | 92.7                                |
|                            | Dímetro Interno ao revestimento (m)    | 4.54                                |

Figura 5. Interface do dimensionamento do moinho de bolas mostrando os parâmetros e as condições operacionais e o resultado obtido para a produção de 300 t/h

#### 4. CONCLUSÕES

A importância do dimensionamento e da escolha adequada dos equipamentos em usinas de processamento mineral é nítida. Em usinas de pequeno porte, apesar da simplicidade, principalmente em termos de quantidade de operações unitárias, há a necessidade de suporte para o dimensionamento e escolha dos equipamentos,

efetuando o dimensionamento de maneira adequada, e que possibilite a análise de múltiplas opções.

O programa computacional exposto neste trabalho foi concebido com o propósito de auxiliar empresas de pequeno porte no projeto de usinas de processamento, atuando no dimensionamento dos equipamentos. A partir de uma interface simples e separação por módulos, um para cada tipo de equipamento, é possível a introdução dos parâmetros e das características do processo de maneira fácil, e, de acordo com os testes realizados, o programa é capaz de obter resultados similares aos previstos na literatura, o que confirma sua eficácia.

Entretanto, observa-se que ainda é necessário atuar no programa para melhorá-lo continuamente. Tais melhorias, incluem: (i) introdução de outras metodologias para o dimensionamento; (ii) elaboração de uma janela específica para a geração de curvas granulométricas no módulo de peneiras vibratórias inclinadas, e; (iii) criação de módulo voltado para correias transportadoras.

## **5. REFERÊNCIAS**

Bond FC. Grinding Ball Size Selection. *Mining Engineering* 1958; 592-95.

Bond FC. Crushing and Grinding Calculations Part I. *British Chemical Engineering* 1961; 6(6);378-85.

Gupta A, Yan D. *Mineral Processing Design and Operation: An Introduction*. 1a. ed. Amsterdam: Elsevier; 2006.

Luz AB, Sampaio JA, Almeida SLM, editores. *Tratamento de Minérios*. 4a. ed. Rio de Janeiro: CETEM/MCT; 2004.

Mular AL, Bhappu RB. *Mineral Processing Plant Design*. 2a. ed. New York: SME/AIME; 1980.

Oliveira RF. Uma revisão dos princípios de funcionamento e métodos de dimensionamento de moinhos de bolas. [Monografia de Especialização]. Escola de Engenharia da Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte; 2012.

Taggart AF. *Elements of Ore Dressing*. London: John Wiley and Sons Inc.; 1951.

Teixeira HG. Desenvolvimento de um sistema para dimensionamento, análise e otimização de circuitos de preparação de minérios. [Dissertação de Mestrado]. Escola de Engenharia da Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte; 2013.

Wills BA, Napier-Munn T. *Wills' Mineral Processing Technology: An Introduction to the Practical Aspects of Ore Treatment and Mineral Recovery*. 7a. ed. Butterworth-Neinemann; 2006. Chapter 1, Introduction, p. 1-29.