

**EVELYN TENAN RIBEIRO**

**ESTUDO COMPARATIVO DE SEGREGAÇÃO EM MÉTODOS DE  
EMPILHAMENTO**

**São Paulo  
2013**

**EVELYN TENAN RIBEIRO**

**ESTUDO COMPARATIVO DE SEGREGAÇÃO EM MÉTODOS DE  
EMPILHAMENTO**

Trabalho de Formatura em Engenharia de  
Minas do Curso de graduação do Departamento  
de Engenharia de Minas e de Petróleo da  
Escola Politécnica da Universidade de São Paulo

Orientador; Prof. Dr. Homero Delboni  
Co-Orientador: Prof. Roberto Delfini Perci

**São Paulo  
2013**

TF-2013  
R354e  
Ligado 2450293

## FICHA CATALOGRÁFICA

**Ribeiro, Evelyn Tenan**

**Estudo Comparativo de Segregação em  
Métodos de Empilhamento/ E.T. Ribeiro. São  
Paulo, 2013.**

**Trabalho de Formatura – Escola Politécnica  
da Universidade de São Paulo. Departamento  
de Engenharia de Minas e Petróleo.**

**1. Operações de controle em mineração 2.  
Amostragem em minerais 3. Equipamentos de  
mineração Universidade de São Paulo.  
Departamento de Engenharia de Minas e de  
Petróleo. IP 201.92.104.85**

H2013d

**DEDALUS - Acervo - EPMI**



31700009715

**Agradeço sinceramente a Embu S.A. pela doação do material,  
Aos meninos do LCT e do LTM por estarem presentes e me ajudarem sempre,  
Ao Sr. Altair pela confecção do gabarito,  
E especialmente aos meus pais e um grande amigo, que me motivaram e  
colaboraram muito para a existência desse trabalho.**

## **Resumo do trabalho**

Com a intenção de contemplar a qualidade exigida atualmente pelo mercado mineral, vem-se por esse trabalho, estudar um aspecto importante e fato crucial na estocagem e homogeneização, práticas comuns do processo de preparação mineral: A segregação granulométrica.

A segregação é um problema comum na manipulação de minérios e que afeta diretamente a qualidade dos produtos minerais. A diferença granulométrica é evidenciada dependendo do método de empilhamento e retomada. Em alguns casos, é responsável por flutuações em teores de produto, variações de tempo de carga circulante em moinhos, ou até mesmo colapso da continuidade do processo pela baixa qualidade de alguns lotes.

A fim de estudar tal problema, suas causas e propor soluções adequadas, quando necessárias, este trabalho toma forma e será alinhado de tal maneira:

- Estudo das pilhas, sua construção e retomada, contando com métodos mais comuns e práticas operacionais, vantagens e desvantagens de cada metodologia e demais problemas do empilhamento.
- Estudo da segregação e suas principais causas.
- Estudo prático da construção de pilhas em três métodos básicos de empilhamento, colheita de amostras e dados através de idealização de dispositivo e análise da seção transversal da pilha.
- Sinopse e conclusão dos dados através da quantificação dos desvios granulométricos, pretende-se apontar o método de empilhamento com menos índice de segregação.

## **Abstract**

*With the intention to cover the quality required nowadays by the mineral costumers, comes up for this work, to study an important and crucial fact in storage and homogenization current practices on mineral preparation process: The particle size segregation.*

*Segregation is a common problem in minerals handling and it affects straight the quality of mineral products. The particle size difference is evidenced depending on the stacking and reclaiming method. In some cases, it leads fluctuations in concentration of product, time variations in recirculating load mills, or even collapse of the continuity caused by the low quality of some batches.*

*In order to study this problem, its causes and propose appropriate solutions, when necessary, this work takes place and it is aligned as:*

- Study of piles, its construction and reclaiming, the most common methods and operating practices, advantages and disadvantages of each methodology and other stacking problems.*
- Study of segregation and its main causes.*
- Practical study of the construction of piles in three basic methods of stacking, taking samples and data with a idealized device and analysis of cross section of the pile.*
- Summary and conclusion of the data by quantifying granulometric deviations, intended to point the stacking method with less segregation.*

## Sumário

|   |    |
|---|----|
| Resumo do trabalho.....                           | 5  |
| Abstratc .....                                    | 6  |
| Introdução .....                                  | 8  |
| Objetivos .....                                   | 9  |
| Desenvolvimento .....                             | 10 |
| 1. Revisão Bibliográfica.....                     | 10 |
| 1.1 Estudo básico sobre pilhas.....               | 10 |
| 1.2 Métodos de Empilhamento e Retomada.....       | 12 |
| Método Chevron .....                              | 13 |
| Método Strata.....                                | 13 |
| Método Windrow.....                               | 14 |
| Outros métodos de empilhamento.....               | 15 |
| Métodos de Retomada .....                         | 15 |
| 1.3 Equipamentos de Empilhamento e Retomada ..... | 16 |
| Empilhadeiras - <i>Stacker</i> .....              | 17 |
| Retomadoras- <i>Reclaimer</i> .....               | 19 |
| <i>Stackers-Reclaimers</i> .....                  | 21 |
| 1.4 Segregação Granulométrica.....                | 22 |
| 1.5 Práticas Operacionais e Dimensionamento ..... | 24 |
| 2. Praticas Experimentais .....                   | 27 |
| 3. Dados Obtidos .....                            | 31 |
| Método Chevron .....                              | 31 |
| Método Strata .....                               | 32 |
| Método Windrow.....                               | 33 |
| 4. Resultados obtidos .....                       | 34 |
| Método Chevron .....                              | 34 |
| Método Strata .....                               | 34 |
| Método Windrow.....                               | 34 |
| 5. Discussão dos resultados .....                 | 38 |
| Conclusão .....                                   | 42 |
| Referências Bibliográficas.....                   | 43 |

## **Introdução**

A manipulação de partículas minerais é na prática um grande desafio para todos Engenheiros de Minas. Uma sequência de problemas relacionados ao manuseio dos minérios pode ser citada e será tratada mais adiante neste trabalho. Dentre problemas como compactação, empoçamento das pilhas e degradação granulométrica, escolheu-se tratar de um aspecto muito comum e importante no processo de empilhamento: A segregação granulométrica.

A segregação granulométrica ocorre porque as partículas resultantes de algum processo de cominuição não possuem mesmo tamanho, há uma distribuição granulométrica que se diferencia ainda mais quando há o empilhamento dessas partículas.

A segregação trata-se de um problema bastante comum na prática de empilhamento. Alguns métodos de empilhamento menos que outros têm a evidência desse problema, que afeta processos posteriores e também a qualidade do produto final. Pode –se citar como exemplos de processos onde atuam a segregação de partículas: a produção de concreto, o asfaltamento de vias, a alimentação de moinhos comuns e do tipo semi-autógenos.

A motivação deste trabalho foi a análise da Planta de Beneficiamento de Bauxita Paragominas, onde a utilização de uma Retomadora de Roda de Caçambas alimenta o SAG responsável pela moagem na usina. A retomadora de Roda de Caçambas retira o minério pontualmente de um lado para o outro de cima para baixo da pilha. Em uma pilha segregada, a alimentação do SAG será descontínua em relação a granulometria, o que prejudica a continuidade do processo de moagem dado que material grosso e fino devem alimentar simultaneamente o moinho.

Neste trabalho serão estudados e comparados três métodos de empilhamento: Chevron, Strata e Windrow segundo a segregação na seção transversal das pilhas e análise da distribuição granulométrica por separação de áreas. Este trabalho consiste na criação e utilização de um dispositivo para estudo da segregação em pilhas, no recolhimento de dados e análise de resultados para os três métodos.



## **Objetivos**

O objetivo deste trabalho é a comparação entre métodos de empilhamento segundo a segregação granulométrica presente em cada método.

Neste trabalho serão comparados os três principais métodos Chevron, Strata e Windrow – já que outras metodologias de empilhamento se tratam apenas de uma combinação desses.

O estudo consiste no estudo desses empilhamentos e construção das pilhas, com retirada de cortes para análise através de um dispositivo dividido em menores áreas, tentando assim observar a distribuição de maneira pontual, assim como na retomada de roda de caçambas.

A finalização dos estudos consiste na apresentação de resultados sobre cada método, através de comparação de gráficos de distribuição granulométrica e dos desvios e variações granulométricas obtidas nos ensaios.

Para isso, foi necessário estudo prévio de cada método de empilhamento, bem como de suas geometrias e sequências de construção. Este trabalho também conta com uma série de acréscimos sobre o tema empilhamento e segregação.

## **Desenvolvimento**

### **1. Revisão Bibliográfica**

Esta seção do trabalho contempla a revisão bibliográfica feita ao longo do trabalho, informações introdutórias e importantes para que os interessados fiquem a par do desenvolvimento do trabalho.

#### **1.1 Estudo básico sobre pilhas**

Durante o processamento mineral, as pilhas são empregadas, principalmente com a necessidade de estocagem. Por se tratar de um processo com custo mais baixo, possível de estocar por longos períodos e em grandes quantidades em relação a silos, o empilhamento é o método de armazenamento mais amplamente utilizado.

Existe também a necessidade de empilhamento não somente para a formação de estoques, seja de produtos intermediários ou acabados. Existem outros principais motivos do empilhamento, que puderam ser encontrados em Chaves [1]:

- Criar estoques para operação sejam estes para curtos ou longos períodos, inclusive para paradas previstas ou de emergência.
- Amenizar as flutuações de vazão da etapa de britagem, providas da lavra. Pode haver diferença de número de turnos entre processos de britagem e moagem, o que acentua ainda mais a necessidade do empilhamento e além do mais, as etapas de beneficiamento são, em geral, de vazão contínua.
- Aguardar algum meio de transporte para embarcar. Estes estoques são típicos em grandes minerações em que há uso de transporte marítimo ou ferroviário.
- Homogeneizar os materiais em diferentes etapas, a fim de adquirir mais qualidade e menor desvio das especificações. São exemplos a blendagem do ROM - antes da britagem primária, as pilhas de homogeneização - na entrada da usina de beneficiamento ou para produtos.
- Formar pilhas para lixiviação de minérios como ouro e cobre.

As pilhas também podem ser introduzidas no processo, com a proposição de otimização e melhoria. Alguns dos benefícios da introdução de pilhas no sistema de estocagem e homogeneização, que segundo Ferreira [2] são mais notáveis:

- Racionalização e otimização das operações de lavra;
- Usinas trabalhando com menor custo operacional e produção com mais qualidade;
- Usinas melhor dimensionadas com o auxílio de estoques;
- Melhores recuperações do produto alimentado no processo;
- A qualidade do produto fica dentro de limites de tolerância mais estreitos, implicando em ganhos cumulativos nos estágios posteriores de processamento.

A utilização das pilhas é bastante benéfica ao processamento mineral, como se pode ver, mas para isso, é necessário o correto dimensionamento e construção das pilhas.

Existem inúmeras maneiras de empilhamento de minério, dentre elas destacam-se de strata, chevron e windrow. Essas pilhas podem ser construídas por equipamentos contínuos como o *stacker*, ou por equipamentos de pátio como caminhões, empilhadeiras, pás carregadoras, etc.



**Figura 1** - Os três métodos de empilhamento que serão tratados neste trabalho: Chevron, Strata e Windrow.

Analizando a **Figura 1**, o método Chevron é identificado por sobrepor material sobre uma pilha de seção triangular camada a camada de forma que estas possuam o mesmo eixo longitudinal, já o método Strata mostra-se um empilhamento de faixas com mesma quantidade de material que crescem se sobrepondo uma a uma a partir de uma primeira pilha de seção triangular, e por último, o método Windrow que consiste em pequenas pilhas acomodadas em forma de seção de mosaico formando um triângulo, este método é caracterizado pelo alto custo de empilhamento, mas também pela alta taxa de homogeneização e alta densidade da pilha. Cada um deles pode ser melhor ou pior dependendo do que se admite como produto e custo da pilha.

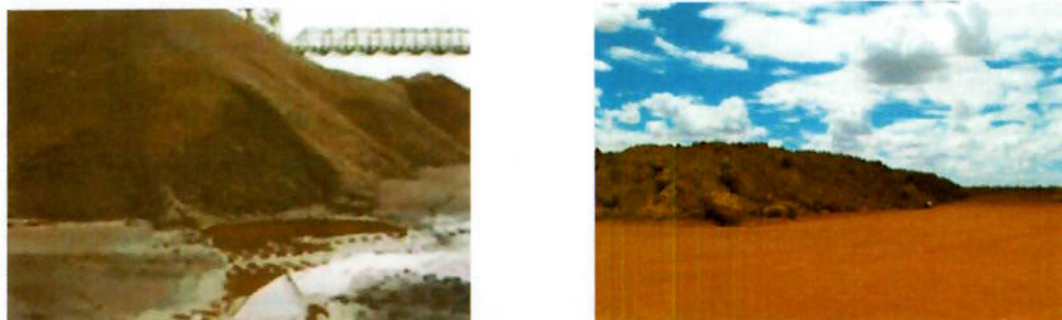


**Figura 2** - Stacker e Reclaimer (da esquerda para a direita).

A retomada pode ser realizada pelo *reclaimer* ou retomadora como também maquinário de pátio, dependendo do grau de automação desejado para o sistema.

A fim de garantir pilhas com qualidade, independentemente do grau de automação que se deseja aplicar, certos cuidados como o controle da umidade e como a alimentação contínua e evitar vazões de empilhamento muito altas são práticas desejáveis. A falta de tais práticas restringe a qualidade do empilhamento, leva a

problemas como má homogeneização, segregação e degradação granulométrica, independente dos métodos aplicados.



**Figura 3** - Problemas comuns aos empilhamentos em boas práticas: Empoçamento e Baixa resistência da pilha são mostrados.

Bom dimensionamento das pilhas é essencial para evitar paradas na usina e no processo seguinte, seja ele o abastecimento de navios ou vagões, entre outros. Por isso, o lay-out do pátio também é importante para otimizar os processos de empilhamento e retomada. Embora os pátios de estocagem e empilhamento requeiram grande espaço e investimento, atualmente sua presença é extremamente comum no processo mineral, pelos tantos benefícios e necessidades que o empilhamento acarreta.

Assim, a utilização de pilhas vem se propagando, no entanto deve-se estar atento a possibilidade ou não de seu uso. Há duas limitações principais sobre seu uso:

- A perecibilidade ou degradação do material durante longos períodos de exposição e relativo à oxidação e iluminação solar (por exemplo, o carvão).
- A granulometria mínima, pois muitas vezes as pilhas ficam expostas ao vento, chuva e até mesmo congelamento, havendo necessidade de pilhas cobertas ou impossibilitando o uso de pilhas devido a alta taxa de perda de material.

As técnicas de empilhamento são bastante difundidas graças a sua abrangência de métodos e número de equipamentos para uso, atendendo assim muitas possibilidades de capacidade de produção/armazenamento, espaço delimitado para pátio, facilidade de manutenção e variabilidade econômica de acordo com o porte de empilhamento.

## **1.2 Métodos de Empilhamento e Retomada**

A seguir são apresentados alguns métodos de empilhamentos coletados em literatura, como mais comuns e aplicados. Podem existir outros modelos de empilhamento, mas não são foco deste trabalho, já que se tratam de combinação dos métodos apresentados priorizando características de um, enquanto há detrimento de outras.



### Método Chevron

Como pode ser visto na **Figura 4**, este consiste basicamente de um conjunto de camadas sobrepostas, alinhadas pela mediatriz da secção transversal, coincidente com o eixo longitudinal da pilha. É o mais comum dos métodos e o mais empregado.

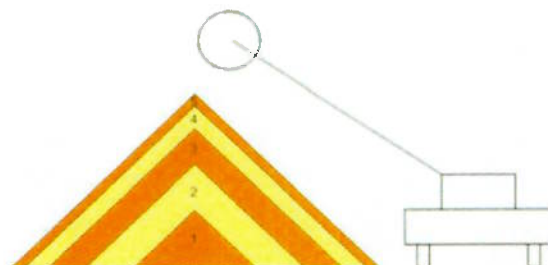


Figura 4-Esquema de empilhamento Chevron

Possui as seguintes vantagens, segundo Chaves:

- O stacker pode ter torre fixa e sua lança, menor comprimento, resultando numa empilhadeira de peso relativamente menor, com um custo total de instalação mais baixo;
- A automação dos equipamentos de empilhamento é mais simples que na maioria dos métodos, com uma chave de reversão em cada extremidade da pilha;
- Possibilita a adição de materiais corretivos em qualquer instante, inclusive nas últimas, o que nos outros métodos não é fácil e nem sempre possível;
- A retomada dos cones extremos é mais simples que nos outros métodos.

### Método Strata

O empilhamento Strata consiste num conjunto de pilhas parcialmente sobrepostas de tal modo que suas linhas de centro se desloquem sucessivamente em direção à linha de centro da secção triangular da pilha acabada, de modo a gerar uma superfície comum que coincide com uma das faces longitudinais da pilha. Este método é ilustrado na **Figura 5**.



Figura 5 - Esquema ilustrativo do método Strata.

A construção de tal pilha inicia-se com o stacker em sua lança mais baixa. Percorre toda a extensão do pátio nesta posição, construindo a pilha prismática inicial. Levanta então a lança e retorna, depositando uma camada inclinada (estrato) sobre a face interna da pilha inicial, de tal modo que a face externa coincida com a camada anterior. Quando chega a extremidade oposta, levanta a lança mais um vez e assim sucessivamente retorna, sucedendo assim até atingir a altura desejada.

Apresenta como desvantagem que apenas se obtém homogeneização parcial do material e por isto, a retomada deve ser feita pela face interior da pilha e que também o stacker se movimenta o tempo todo, acarretando em mais gastos energéticos.

No entanto, o método possui as vantagens de obter degradação granulométrica mínima, pois na pilha inicial a lança está em sua posição mais baixa e nas camadas subsequentes, o material rola sobre a face interna, e sua automação é bastante fácil.

São muito utilizadas em carvão, pois permitem a utilização do princípio FIFO (first in, first out), indispensável no empilhamento de carvões, isto por que, para um melhor resultado, a pilha Strata deve ser retomada necessariamente pela face, sendo indicada a utilização de retomadoras do tipo portal com arrastador. Estas retomadoras permitem a transposição das pilhas, característica responsável por sua popularização no manuseio de carvões.

### Método Windrow

O método windrow consiste no empilhamento de cordões elementares sucessivos ao lado e superiores aos anteriormente postos longitudinalmente em relação a pilha.

Para iniciar a construção das pilhas windrow, o stacker posiciona sua lança perpendicular ao seu percurso e abaixada até a altura mínima de operação. Segundo a Ele percorre a extensão do pátio construindo a pilha elementar 1, quando chega a extremidade do pátio, gira a lança até atingir a posição 2, da qual segue para 3 e assim sucessivamente, com elevação da lança são construídas as pilhas superiores até a pilha 21.

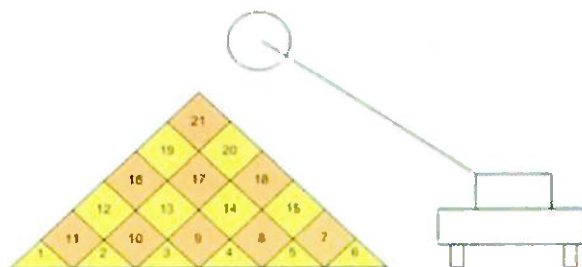


Figura 6 - Esquema ilustrativo do método Windrow.

São vantagens do método a melhor homogeneização e a maior densidade, além de que a segregação granulométrica das partículas é consideravelmente reduzida, pois fica distribuída dentro dos cordões.

Porém conta com as desvantagens de, segundo Chaves:

- Se houver necessidade de adição de material corretivo, este ficará localizado somente em partes específicas da seção transversal, o que dependendo do método de retomada, pode tornar a correção ineficiente ou até agravar a variabilidade cíclica do material.
- É necessária uma empilhadeira com lança giratória ou telescópica, dotada de movimento também vertical e lança mais longa, o que aumenta o custo com relação a aquisição de equipamento.
- A utilização dos cones extremos é bem mais difícil, sendo necessário recirculá-los.

- A utilização dos movimentos do stacker é bem mais complexa, requerendo mais automação.

### Outros métodos de empilhamento

Alguns outros métodos de empilhamento podem ser encontrados na literatura, eles se tratam de combinações ou então são métodos pouco usados para empilhamento, dado que também são menos conhecidos. Alguns métodos podem ser citados:

- Método Multichevron
- Método Six Row
- Método Cone Shell

No Anexo A podem ser encontradas informações sobre esses demais métodos, sendo interessante dentre estes apenas referir-se sucintamente ao método Six Row que é um método intermediário entre Chevron e Windrow com a tentativa de combinar as vantagens.

Assim como no método Windrow a segregação é diminuída e melhor distribuída ao longo da seção transversal, e também há menor gasto de energia pela diminuição de movimentos da empilhadeira, no entanto a empilhadeira utilizada é a mesma da Windrow. Este método se trata do melhor custo benefício para diminuir a segregação a um custo mais baixo que Windrow.

### Métodos de Retomada

O conhecimento do método de retomada é tão importante quanto do empilhamento, pois a retomada pode evidenciar ou prejudicar características garantidas no método de empilhamento.

Sobre a operação de retomada, são possíveis retomadas em fatias, bancadas e em blocos. A retomada também pode ser lateral ou transversal a pilha como veremos os equipamentos que são aplicados em cada caso. A Figura 7 ilustra as três principais maneiras de se retomar uma pilha,

Na retomada em fatias, a retomadora opera com a lança retirando uma fatia da extremidade da pilha, e depois avançando o comprimento equivalente a fatia a ser extraída. Na retomada em bancadas, a lança da retomadora é levantada e a roda de caçambas vai retomando apenas a parte superior da pilha de uma extremidade à outra. As bancadas são retomadas com a mesma altura, assim a quantidade de material retomado é diferente por passada, crescendo do topo para a base. Na retomada em blocos, a lança da retomadora é levantada e a roda da caçamba é levantada e a roda de caçambas vai retomando apenas parte superior da pilha até o limite do bloco. Após a retomada do primeiro bloco, a retomadora retrocede e para retomar o segundo bloco (abaixo do primeiro).

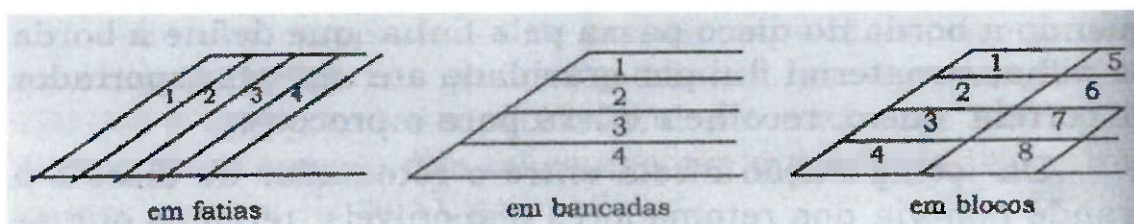


Figura 7 - Esquema ilustrativo dos Métodos de retomada.

É visto que na retomada por fatias existe a melhor homogeneização, seguida de blocos. A retomada por bancadas retira o mesmo tipo de material (estatisticamente) em cada passada, sendo a homogeneização afetada. No caso deste trabalho, o estudo da seção transversal da pilha também pode ser utilizado como ferramenta importante para a escolha do método de retomada empregado.

### 1.3 Equipamentos de Empilhamento e Retomada

Alguns equipamentos serão mostrados neste trabalho com o intuito de abranger a gama de conhecimento necessário sobre as pilhas. O objetivo, no entanto não é tratar dos equipamentos em si, mas sim do que a escolha de cada método implica em aquisição destes equipamentos.

Existe um número muito grande de equipamentos e de técnicas para construção de pilhas. Basicamente, a concepção das pilhas varia com o nível de automação que se deseja empregar em suas construções, a quantidade de material a ser movimentado, o local/espço admitido para empilhamento e o tempo de projeto. Essas características influem diretamente no custo de capital e no custo operacional.

Projetos de pilhas com custo de capital mais barato utilizam-se comumente de caminhões, tratores, pás-carregadoras, ou seja, maquinário de pátio, que pode possuir pouca automação, elevando os custos operacionais com mão de obra e manutenção. No entanto, ao se tratar de construção de pilhas de pequeno porte e também para projetos de mineração de tempo de vida de poucos anos, são bastante válidas tais opções.

Quando se trata de projetos de maior porte e mais longa vida, pilhas são construídas com o auxílio de automação e transportadores de correia nas formas de empilhadeira (*stacker*) e retomadora (*reclaimer*) são utilizadas. A tendência moderna é de usar cada vez mais equipamentos contínuos com consumo de energia elétrica ao invés de diesel.

A fim de dimensionar uma pilha ou pátio de empilhamento deve-se estar atento a todos os aspectos envolvidos para sua construção, sejam eles o método de empilhamento, os equipamentos utilizados, a capacidade das pilhas e o espaço disponível para a construção das mesmas.

Um aspecto interessante, apontado por Ferreira [2], é que pode-se utilizar um modelo genérico para avaliar qual tipo de equipamento utilizar através da construção de um gráfico como mostrado na **Figura 8**. Como o custo dos transportadores necessários é diretamente proporcional ao comprimento do pátio, e por conseguinte, quanto menor a largura das pilhas, mais baratos são as empilhadeiras e os retomadores.

Assim, a largura das pilhas é, no entanto, característica de processo requerida pela capacidade da pilha ou espaço requerido ou até mesmo, exigência para gerar um produto dentro das especificações de variabilidade exigidas.



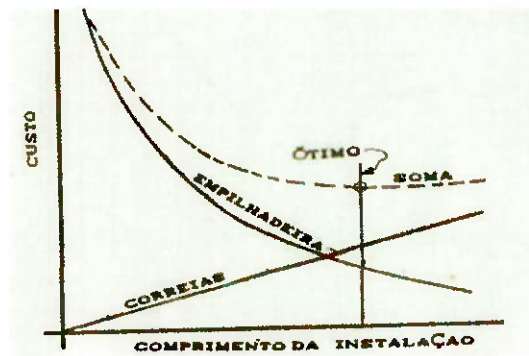


Figura 8 - Gráfico extraído de Ferreira[2] - Custo de empilhamento x Largura das pilhas.

Portanto, para pilhas mais largas são empregados comumente equipamentos ou máquinas de pátio de operação não contínua, pois equipamentos contínuos levam a um custo capital muito alto. Em nosso caso, o estudo se limita a equipamentos contínuos, já que estes estão intrinsecamente ligados à escolha dos métodos, enquanto que equipamentos de operação descontínua não exibem esta relação.

#### Empilhadeiras - *Stacker*

As empilhadeiras ou *stacker* são encontradas no mercado em modelos diferentes segundo sua complexidade de movimento. Esses movimentos podem estar presentes segundo o método de empilhamento:

- Translação sobre trilhos;
- Elevação e abaixamento da lança;
- Rotação da lança até 180°.

As capacidades variam em torno de 100 a 8000 t/h e sua velocidade de translação pode chegar a 30m/min e o comprimento da lança a até 40m.

As empilhadeiras são compostas basicamente de trilhos, base móvel para translação, torre, lança giratória, telescópica, ascendente e descendente, tripper e correia do pátio.

O empilhamento dos materiais pode ser realizado através dos seguintes grupos principais de empilhamento:

- Empilhadeira com lança fixa e única: é o caso de empilhamento Chevron e quando o material não causa levantamento de pó, nem há situação crítica de degradação granulométrica.



Figura 9 - Empilhadeira com lança fixa e única instalada em Mina de Vargem Grande.

- Empilhadeira com lança única, torre fixa e movimento na vertical (basculável): Praticamente o mesmo caso da empilhadeira anterior, mas que leva em consideração problemas como levantamento de poeira e degradação granulométrica.



Figura 10 - Empilhadeira basculável instalada na Mina de Apatita da Bungue.

- Empilhadeira com lança única e torre giratória: Traz maior autonomia de movimentos, no entanto, é mais cara sua aquisição. Geralmente, é utilizada no método Wiindrow e similares.



Figura 11 - Maior *Stacker* de minério de ferro localizado no Porto de Itaqui, MA.

- Empilhadeira com lança dupla (fixa ou fixa com movimento na vertical, e também pode adquirir movimento giratório): é mais utilizado quando há a necessidade de empilhamentos múltiplos.



Figura 12 - Empilhadeiras com duas lanças móveis - Isomonte S/A.

- Empilhadeira com lança fixa e correia retrátil: Tem o mesmo campo de atuação que a empilhadeira de torre giratória, no entanto, requer menos espaço de pátio.
- Transportador de coreia acoplado a tripper: Quando não há preocupação com segregação ou degradação granulométrica. O tripper pode ser instalado junto ao teto ou em estrutura e nele é acoplado um transportador de correia.



Figura 13 - Transportador de Correia acoplado a Tripper.

Além das máquinas apoiadas sobre trilhos, existem máquinas apoiadas sobre esteiras, no entanto são minoria, mas quando se trata de pilhas muito largas ou não se justifica a aquisição de máquinas sobre trilhos, fazem-se necessárias. Estas máquinas costumam ser mais lentas e pesadas que sobre trilhos.

### Retomadoras- *Reclaimer*

Para a retomada, são utilizados equipamentos ditos retomadores ou *reclaimers*. Estes consistem basicamente em um equipamento similar a empilhadeira, mas contam com uma ou mais rodas de caçamba, ou outros mecanismos, que retiram o material da pilha. Suas capacidades de retomada variam desde 100 t/h até 28000 t/h. Tem-se uma infinidade de equipamentos como o "bucket Wheel reclaimer", "bridge scrapper reclaimer", "drum reclaimer", retomador de disco e retomador lateral.

Pode-se dividir os equipamentos de retomada em dois grandes grupos:

- Retomador lateral
- Retomador de seção transversal

Dentre estes, vamos examinar mais a fundo os retomadores de seção transversal. Sendo possível encontrar mais informações sobre os retomadores laterais no Anexo A.

Na categoria de retomadores de seção transversal, ainda há a subdivisão seguinte:

- *Scrapper*
- *Bucket Wheel*

Para fins de estudo deste trabalho, apenas os sistemas *Bucket Wheel* são relevantes, dado que os retomadores tipo *scrapper* desagregam a seção transversal da pilha e homogeneizam este material, fazendo com que a segregação seja praticamente dizimada. Portanto, informações sobre sistemas tipo *Scrapper* também podem ser encontradas no Anexo A.

Além disso, assim como nas empilhadeiras, estas máquinas podem ser apoiadas sobre trilhos ou sobre esteiras. A tendência é a escolha por máquinas sobre trilhos, visto que embora sua aquisição seja mais cara, exibem maior facilidade de operação, menor desgaste e possibilidade de automação.

As máquinas retomadoras de seção transversal são aplicadas na maioria das instalações que necessitam de melhoria da heterogeneidade do material. São dois exemplos de retomadores muito utilizados no mercado: o retomador de lança com roda de caçambas e o de ponte com roda de caçambas:

- Retomador de Ponte com roda de caçambas (Bridge Bucket Wheel Reclaimer):

Uma roda de caçamba dotada de movimento de translação perpendicular ao eixo da pilha escava o material, jogando-o num transportador de correia perpendicular ao eixo da pilha e sobre a ponte.

A velocidade transversal da roda é variável, baixa no centro e alta na extremidade da pilha, reduzindo assim as variações na vazão do produto na roda de caçamba, quando esta retoma uma pilha de seção triangular.

Cada vez que a roda de caçamba alcança um dos extremos da pilha, o retomador avança um passo no sentido longitudinal, de forma que ocorrendo a reversão no movimento transversal numa nova fatia começa a ser retomada. A produção do sistema é restringida a amplitude deste passo de avanço.

Este tipo de retomador tem algumas vantagens com relação aos outros retomadores:

- Maior capacidade de estocagem pode ser acomodada na mesma área, uma vez que as caçambas podem escavar abaixo do nível dos trilhos.
- O custo das obras civis é comparativamente mais baixo, dado que a máquina pode operar sobre trilhos elevados.
- O custo comparativamente menor da manutenção e das peças de desgaste.
- Manuseiam melhor materiais pesados e abrasivos.
- Os retomadores de roda de caçambas podem ser projetados com caçambas reversíveis, de modo a tornar possível a retomada de duas pilhas longitudinais com eixos coincidentes ao mesmo tempo.

Este tipo de máquina tem a desvantagem de não retomar o material de toda a face da pilha de uma só vez, havendo um movimento transversal da direita para a esquerda e vice-versa, gerando assim, um ciclo de variação da qualidade do material retomado.

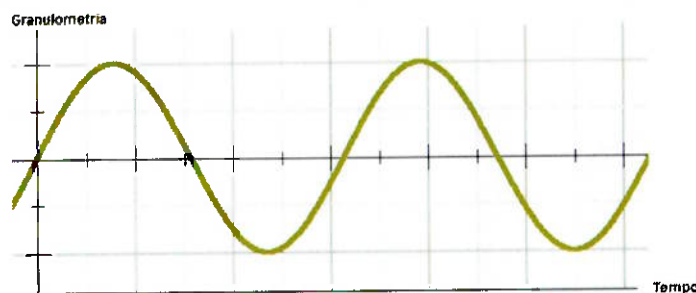


Figura 14 - Ilustração do comportamento granulométrico obtido em roda de caçambas.

Quando na ponte, há a instalação de duas ou três rodas de caçamba, o retomador aumenta a frequência de variação e diminui a amplitude na retomada. O aumento da quantidade de rodas aumenta a capacidade de produção, além da diminuição de variação. No entanto, três rodas é o limite de peso do equipamento. O projeto da caçamba é específico para cada tipo de material a ser manuseado, função de sua coesividade e da sua abrasividade e assim projeta-se a largura, profundidade e material das bordas da caçamba.

Nesse retomador, também existe a possibilidade de colocação de um sistema de ancinhos que desagregam o material da seção transversal antes de retomá-lo, podendo assim diminuir o efeito de segregação.



Figura 15- Retomador de Ponte com roda de caçambas.



- Retomador de lança com roda de caçambas (Bucket Wheel Reclaimer):

Trata-se de uma adaptação do retomador de ponte com roda de caçamba, que ao invés de uma ponte com caçamba(s) possui uma lança com roda de caçamba na extremidade. O movimento da lança varre toda a seção transversal da pilha, sendo que quando a pilha for muito larga, é preferível tal equipamento sobre esteiras.

Pode haver também um sistema de ancinhos, que desagrega o material, jogando-o na base da pilha, para sua retirada como transportador de correias. Em unidades muito grandes, geralmente não existe o sistema de ancinhos, pois a própria roda de caçambas escava o material, porém para materiais muito coesivos é possível escavar de baixo para cima, sendo cuidadoso com a possibilidade de desabamento da seção.

Neste também, assim como no retomador de ponte com roda de caçamba, há a formação de ciclos de variação de qualidade do material. Quando a seção transversal se torna muito grande, isto ajuda a amenizar a formação destes ciclos.



Figura 16 -Retomador de lança com roda de caçamba.

### Stackers-Reclaimers

Existem também equipamentos especiais da família das retomadoras que com a inversão de movimento são capazes de também empilhar, são conhecidas como *stacker-reclaimer*. Este tipo de equipamento é ideal para instalações com capacidade de pilha de baixo volume e alta atividade de armazenamento entre 30 mil e 60 mil toneladas, onde as operações são realizadas por retomada da seção transversal da pilha. Estas conseguem retomar taxas normalmente variam de 2.000 a 4.500 toneladas.

*Stacker-reclaimers* do tipo giratório são tipicamente usados em instalações que grandes quantidades de material devem estar facilmente disponíveis, onde a mistura de tipos de material é necessária ou, quando o comprimento disponível do pátio é limitado.



Figura 17 - Modelo de Stacker Reclaimer.

#### 1.4 Segregação Granulométrica

A segregação granulométrica como já citado de diversas maneiras neste trabalho, trata-se de um problema comum durante o empilhamento. Este problema ocorre porque as partículas resultantes de algum processo de cominuição não possuem mesmo tamanho, há uma distribuição granulométrica que se diferencia ainda mais quando há o empilhamento dessas partículas.

A segregação trata-se de um problema bastante comum na prática de empilhamento. Alguns métodos de empilhamento menos que outros têm a evidência desse problema, que afeta processos posteriores e também a qualidade do produto final, e no caso de alguns materiais é fator determinante da qualidade, pois pode estar atrelada ao teor e também, à homogeneização requerida para o processo seguinte.

Nota-se que durante qualquer movimentação de material granular seja este principalmente por transportador de correia (devido a sua vibração) e especialmente no derramamento deste material sobre uma pilha, as partículas de maior dimensão tendem a se separar das partículas menores.

Durante o transporte das partículas em transportador de correias, pequenos movimentos de salteamento das partículas levam as partículas finas para a parte de baixo, pois há uma tendência de passagem dessas pelos vazios. E assim é gerado um momento maior nas partículas mais altas na descarga. A **Figura 18** demonstra como ocorre a segregação durante o transporte de material durante o transportador de correia. O material mais fino acaba por cair mais próximo do transportador e do pé da pilha, já que adquire momento inferior em relação as partículas maiores.

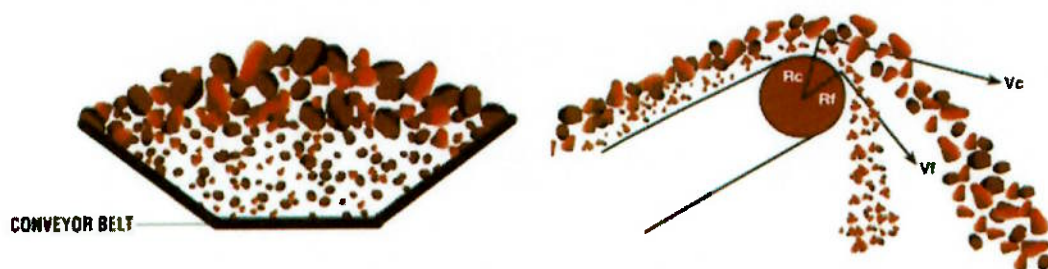


Figura 18 - Demonstração da segregação em transportador de correia.

No empilhamento, as partículas maiores tendem a rolar sobre a pilha e se depositarem ao pé da base, o que não ocorre com as partículas menores que somente se movem por escorregamento, ou seja, por isso tendem a se concentrar no centro. O momento de inércia das partículas maiores é responsável pelo seu movimento, que faz com que se realize maior deslocamento, no qual as partículas se afastam do centro da pilha e, além disso, gera rolamento sobre a pilha, levando estas partículas junto à base extrema da pilha.

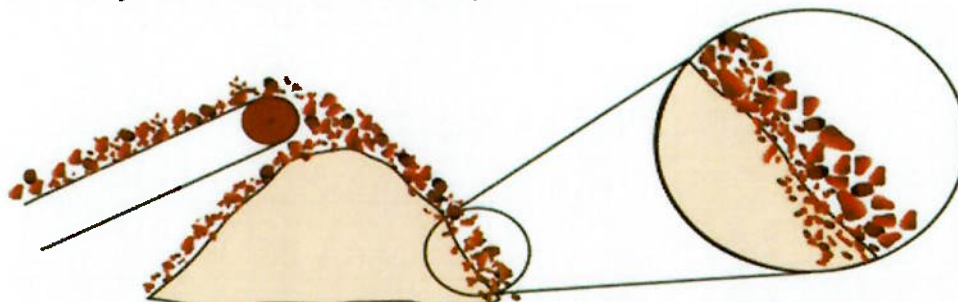


Figura 19 - Demonstração da segregação granulométrica na pilha.

Além da tendência de ocupar vazios, os finos também contém maior umidade, devido a maior aderência de água superficial, que faz com que eles tendam a se prender à correia do transportador e sejam removidas apenas pelo raspador, isto é, atrás do ponto de descarga das partículas grosseiras. A umidade aliada a falta de massa, faz com que estas partículas fiquem onde caem, acumulando-se assim nas partes centrais e posteriores da pilha.

Sendo assim, caso haja retomada realizada pela base ou os lados de uma pilha, o produto retomado será bastante diferente, granulometricamente, que o material central.

Quando a pilha é retomada por pás-carregadeiras, a segregação se torna mais nítida, mas mesmo com retomada contínua em seções perpendiculares ao eixo como é realizada por roda de caçamba a variação de material se torne periódica e muitas vezes não pode ser suportada pelo processo. Por isso que, como citado anteriormente, as retomadoras de roda de caçamba sobre pontes têm vantagem sobre as de ponta de lança, pois diminuem o período de variação de granulometria na retomada. Quando a pilha é retomada por baixo, somente as partículas mais finas que estão no centro serão descarregadas.



Figura 20 - Exemplo prático de segregação em ração para aves.

O problema de segregação é nitidamente um empecilho no processo não só mineral e precisa ser dizimado ou diminuído para que se atenda padrões de

qualidade do produto, como se pode ver na **Figura 20**, onde foi realizado estudo para ração para aves.

No entanto, este não é o único problema encontrado durante o processamento mineral, e cabe ao menos citar outros problemas, sendo possível encontrar melhor detalhamento destes no Anexo A.

Dentre os problemas encontrados relativos ao manuseio mineral pode-se encontrar em Chaves[1]:

- Degradação Granulométrica,
- Desprendimento de Poeiras,
- Contaminação de águas superficiais,
- Contaminação de águas subterrâneas,
- Compactação,
- Umidade,
- Morto,
- Semicones.

## **1.5 Práticas Operacionais e Dimensionamento**

Nesta revisão bibliográfica tentou-se colocar o leitor a par de todos os aspectos importantes para o estudo comparativo de segregação nas pilhas, finalizando assim, com uma breve introdução sobre as práticas operacionais de empilhamento e dimensionamento.

Para construir uma pilha, segundo Schofield [3], as características físicas do material tais como densidade aparente, umidade, ângulo de repouso, distribuição granulométrica, características de fluxo, abrasividade e tendência a geração de poeira são importantes para determinar a aquisição de equipamentos. Os equipamentos costumam ser o elemento mais caro do projeto e precisam estar muito bem dimensionados. Existe uma sequência de projeto de pilhas recomendada pela engenharia:

- Localização das pilhas e lay-out do pátio;
- Dimensionamento geométrico da pilha de acordo com a capacidade requerida;
- Dimensionamento de equipamento de manuseio;
- Uso de revestimento nos equipamentos e escolha de material apropriado para ancinhos, raspadores, dentes devido à abrasividade do minério;
- Uso de cobertura nas pilhas, principalmente para materiais muito finos.

A localização das pilhas deve levar em consideração aspectos naturais do ambiente como pluviosidade, exposição ao sol, direção dos ventos, além de aspectos sociais e de higiene humana, como a necessidade de localização destas longe de construções na planta ou habitações, devido a geração de poeira ou barulho.

Quanto à seleção do espaço físico da construção das pilhas, são levados em consideração para a consolidação do projeto:

- Espaço disponível e seu formato de área que determina a distribuição das pilhas paralelas ou longitudinais;



- Topografia da área;
- Condições do solo no local com vista a eventuais recalques, necessidade de compactação, etc.
- Necessidade de futuras expansões da instalação.

As pilhas devem preferivelmente ser construídas em terreno plano, aterrado e previamente adensado, a fim de evitar deslizamentos, soterramentos ou afundamento do solo. No caso de materiais solúveis em água e que podem trazer contaminação de lençóis freáticos, a impermeabilização do solo é exigida.

A disposição das pilhas deve ser feita escolhendo-se um lay-out que priorize as necessidades de custo de equipamento ou espaço físico. Para pilhas de pequeno porte, é possível sua configuração circular com retomada por baixo, mas para pilhas de maior porte é comum a escolha de pilhas alongadas, oscilando entre pilhas alinhadas com prioridade de custo de equipamento e pilhas paralelas quando o fator limitante é o espaço físico. Mais informações sobre lay-out de pátio podem ser obtidas no Anexo A.

Quanto ao dimensionamento geométrico da pilha, deve-se estar atento as características levantadas por Schofield [3] como densidade aparente, umidade, ângulo de repouso, distribuição granulométrica, características de fluxo, abrasividade e tendência à geração de poeira. É importante tratar destas características e como elas influenciam no dimensionamento da pilha.

Cabe então, explicar no que consiste o ângulo de repouso do material, pois este que determina juntamente a disponibilidade de espaço para a construção da pilha, a largura, altura e, portanto, a capacidade da pilha.



Figura 21 - Ilustração do ângulo de repouso de um material.

O ângulo de repouso ou do ângulo crítico de repouso de um material granulado é o ângulo de mergulho da inclinação em relação ao plano horizontal, quando o material está colocado em forma de pilha em uma superfície com inclinação tal qual provoca iminência de deslizamento. Este ângulo é encontrado de  $0^\circ$  a  $90^\circ$ . O ângulo interno está relacionado com a densidade, área superficial e formas das partículas, e o coeficiente de atrito interno do material.

A densidade aparente dos grãos, junto à distribuição granulométrica e a umidade determinam a estrutura interna e a consistência da pilha. Pilhas com granulometria pouco distribuída têm grande índice de vazios, o que diminui sua densidade e torna a pilha menos resistente a impactos, inclusive de sobreposição de material.

Fazendo-se uma analogia a caracterização de solos, podemos indicar que a umidade pode apresentar característica benéfica ao empilhamento, trata-se de uma faixa em que o material se comporta plasticamente, ou seja entre o limite de Plasticidade e de Liquidez, conferindo assim maior consistência e rigidez a pilha. Para pilhas que devem permanecer por longos períodos, a umidade pode auxiliar a evitar a alta geração de pó. Trata-se da água superficial que gruda as partículas menores às maiores e evita perda de material e complicações ambientais.

A abrasividade encarece o processo de empilhamento e de retomada, bem como a angulosidade do material, a necessidade de mais trocas periódicas de correia do stacker e também de ancinhos ou das placas de caçambas é consequência destes fatores.

Quanto ao fluxo de material são determinados a partir dos requisitos de processo, que segundo Ferreira [3] podem ser listados:

- Faixas operacionais de fluxo de empilhamento e retomada;
- Capacidade de estoque, segundo a finalidade da pilha;
- Necessidade, ou não, de fluxos de retomada constantes;
- Necessidade ou não de se evitar a degradação granulométrica;
- Necessidade de se montar estoques cobertos;
- Necessidade de empilhamento e retomada simultâneos;
- Necessidade de empilhar/retomar continuamente, sem interrupção;
- Necessidade de acesso a algum estoque estratégico localizado nas adjacências.

Em pátios de homogeneização, obrigatoriamente, existem duas pilhas uma sendo construída e outra sendo retomada, e por isso a construção de uma das pilhas deve estar em 50% enquanto a outra já teve metade de seu volume retomado.

Em pátios de expedição, a vazão de retomada é muito maior que a de empilhamento, e esta proporção precisa ser alterada, por exemplo, com a construção de pilhas adicionais. Em pátios de empilhamento de siderúrgica, que recebem o carregamento de navios, ocorre necessariamente o contrário.

E também no caso de pilhas de homogeneização, devemos ficar atentos à necessidade de homogeneização do material, medida pelo desvio padrão admissível na alimentação e adquirida nas pilhas, além de poder haver ou não, a presença de materiais diferentes na pilha, que requeiram processamento.

A escolha de equipamento está quase que totalmente atrelada ao método de empilhamento e retomada, que vão garantir certos requisitos de processo. Pode haver a possibilidade de dois ou mais equipamentos de possível operação, assim o critério de desempate é principalmente o custo. A escolha dos equipamentos devido a sua facilidade de operação e grau de automação, além de complexidade mecânica e prazo requerido para a construção ou implantação da instalação versus custo de capital e custo operacional perfazem a etapa decisória do projeto das pilhas.

## 2. Práticas Experimentais

O maior desafio deste trabalho foi idealizar a metodologia de estudo e tentar adaptar o empilhamento em escala industrial para um estudo em laboratório, em pequena escala, mas que fosse representativo à realidade.

Várias alternativas foram analisadas, principalmente sob aspectos práticos no que se refere a seleção do material, volume das pilhas, formas de obtenção de amostras representativas da pilha, entre outros.

Quanto ao material, utilizou-se brita graúda doada pela Embu S.A. da pedreira de Itapeti. O material foi escolhido pela sua conveniência na preparação e sua homogeneidade.

O primeiro passo foi a preparação do material para compor a pilha. Para isso foram consumidos cerca de 3 toneladas de brita graúda (top size 3") que foram britados em britador de mandíbulas de um eixo com especificação de  $\frac{3}{4}$ " existente no LTM, a fim de se obter material graduado conforme resultante de um processo de britagem e peneiramento. A **Figura 22** mostra o processo de britagem.



Figura 22 - Britagem do material doado.

O material então foi passado rapidamente por um escalpe em peneira vibratória com abertura de 0,85 mm de maneira a retirar uma porcentagem de seus finos. Embora na literatura não se encontre nenhuma limitação ao empilhamento com material fino, decidiu-se limitar a distribuição granulométrica, uma vez que o estudo proposto limita-se a partículas relativamente grosseiras, aqui definidas como maiores que 0,85 mm. Além deste aspecto, a diminuição da quantidade de finos do material evita geração de poeira, priorizando a saúde dos envolvidos na operação.

Em seguida, foi feito escalpe para os grossos acima de 1", pois partículas muito grossas impossibilitariam o corte da pilha com o dispositivo e causariam a destruição da seção transversal na pilha ao tentar encaixar o dispositivo.

Além dos motivos operacionais, verificou-se que seria necessária a definição de um *top size* e de um "tamanho mínimo de partícula" para geração das curvas granulométricas, quais sejam, entre 25,4mm e 0,85 mm.

A **Figura 23** mostra o escalpe de finos como o de grossos. A **Tabela 1** informa sobre a distribuição granulométrica do material antes do escalpe.





Figura 23 - Fotografias do escalpe de finos e de grossos.

Tabela 1 -Distribuição granulométrica da amostra obtida por britagem.

|                    |        |
|--------------------|--------|
| # +25,4 mm         | 6,95%  |
| # -25,4mm + 12,7mm | 62,97% |
| # -12,7mm + 6,35mm | 20,29% |
| # -6,35mm + 3,15mm | 5,81%  |
| # -3,15mm + 1 mm   | 2,02%  |
| # -1 mm + 0,85 mm  | 0,37%  |
| # -0,85 mm         | 1,59%  |

Um dispositivo foi criado para obtenção da seção transversal da pilha. A partir deste dispositivo utiliza-se o termo “corte” para cada fração efetuada na seção transversal da pilha e “seção” para cada seção menor dentro de cada corte. Nota-se na **Figura 25** que o corte seria todo o material obtido com o dispositivo, enquanto que cada seção se trata de uma dessas lacunas que serão preenchidas por material.

A ideia *a priori* seria estudar pontualmente a seção transversal da pilha. O dispositivo foi idealizado a partir de um corte da seção do método sixrow, dado que esse método pode ser fruto de comparação, já que é aceito como o melhor custo/benefício em quesito de homogeneização, visto que também não seria possível uma análise pontual do material. Este dispositivo é capaz de cortar a seção transversal, denominada de corte, e estudá-la em várias áreas menores denominadas seções.

Para iniciar o projeto do dispositivo, levou-se em conta alguns aspectos como a dimensão mínima da seção transversal em estudo – assim, definiu-se as pilhas em seções de 1m de largura, levantamento do ângulo de repouso do material, que foi buscado em literatura inicialmente e determinado posteriormente com pilha em dimensões similares à de estudo para confirmar tal dado, conforme mostra a **Figura 24**. O ângulo de 29,5° foi obtido e arredondado para 30° por motivos de facilidade operacional.



Figura 24 - Estudo do ângulo de repouso.

A confecção do dispositivo de corte se deu por técnico Altair de Jesus do LTM que confeccionou este dispositivo em prazo curto com as características adequadas de corte e resistência- o dispositivo foi feito em aço com soldagem das partes. O dispositivo também deveria colher o material e por isso foi fechado em sua parte posterior. O dispositivo foi produzido no LTM e testado para corte. Suas arestas foram aparadas, obtendo-se bom resultado de corte.



Figura 25 - Dispositivo de corte e amostragem de material para estudo da pilha.

A escolha dos três métodos Strata, Chevron e Windrow, como descritos na seção 1.2 deste trabalho, para construção das pilhas se deu devido a serem os três métodos básicos de empilhamento. Sabe-se que outros métodos são oriundos da combinação desses métodos em princípio de melhorar algumas de suas características em detrimento de outras.

As dimensões da pilha foram selecionadas em literatura em uma relação mínima de largura por comprimento de 1:5 para se desprezar o efeito das pontas. A seção transversal de um metro de largura foi escolhida com o intuito de confecção do dispositivo.

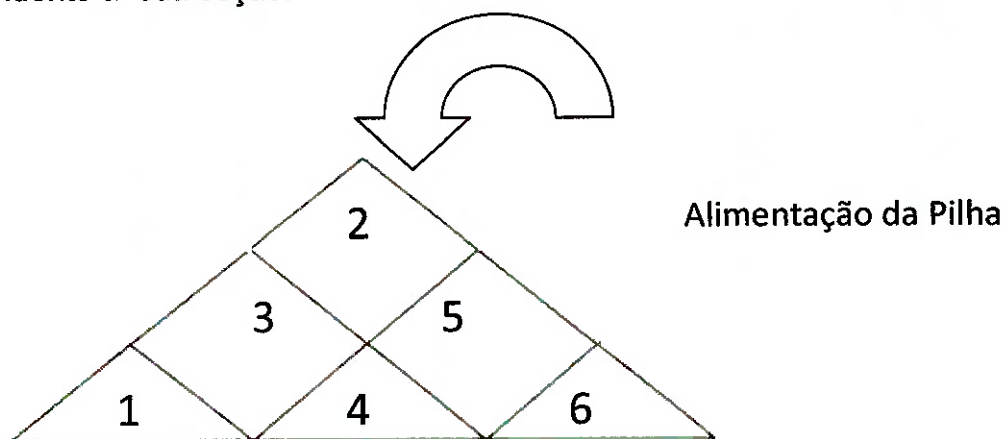
Antes da construção das pilhas, o material foi homogeneizado e o local da pilha foi preparado e para as formação das três pilhas foi utilizado o mesmo material preparado anteriormente.

Na construção das pilhas, tentou-se imitar o movimento de uma lança dotada de transportador de correia para o material. Os movimentos foram executados com vibração e sempre alimentando de um mesmo lado foram atentadas. As construções das pilhas procederam sem nenhuma maior dificuldade.



Figura 26 - Homogeneização e pilhas Chevron, Strata e Windrow.

A metodologia de corte da pilha com o auxílio do dispositivo é ilustrada no diagrama seguinte. Foram feitos cortes em três seções de cada pilha e cada corte possuía 6 ( sixrow) lacunas a serem preenchidas com material regular correspondente à sua seção.



Assim é de se esperar que haja mais finos em 6 do que em 1 , assim como em 5 do que 3 , independentemente do método escolhido, sendo que em alguns métodos essa característica é mais evidente do que em outros. Isto dado porque materiais mais finos tendem a escorregar pelas lacunas, segregando-se no pé da pilha, enquanto materiais mais grossos permanecem no topo sem mobilidade.

O aspecto mais importante de cada seção é a sua distribuição granulométrica, independentemente da massa contida em cada compartimento do dispositivo. A retirada do material para amostragem é ilustrada na **Figura 27**.





Figura 27 - Corte da pilha com o dispositivo.

O material retirado manualmente de cada pequena seção foi peneirado em peneiras de 1 mm; 3,15 mm; 6,35 mm; 12,7 mm. Cada faixa foi pesada em balança de precisão  $\pm 0,05$  g conforme é mostrado na Figura 28.



Figura 28 - Amostragem e Pesagem do material.

### 3. Dados Obtidos

Os dados obtidos foram as massas de cada faixa granulométrica de cada seção. Em cada método/pilha foram feitos três cortes e foi analisado o desvio percentual para cada faixa para validação do método.

#### Método Chevron

Tabela 2 - Amostras do Corte A-Método Chevron

| Malha (mm)     | Massa da amostra (g) |        |        |        |        |        |
|----------------|----------------------|--------|--------|--------|--------|--------|
| Corte A        | 1                    | 2      | 3      | 4      | 5      | 6      |
| # -25,4 + 12,7 | 2230                 | 2452   | 2405   | 1840   | 2809   | 1201   |
| # -12,7 + 6,35 | 271,5                | 694    | 673    | 659    | 847    | 404    |
| # -6,35 + 3,15 | 7,3                  | 262,7  | 219,4  | 466,2  | 326,3  | 130,1  |
| # -3,15 + 1    | 0,8                  | 49,4   | 42,1   | 145,9  | 53,7   | 14     |
| # -1 + 0,85    | 2,1                  | 15,7   | 13,4   | 35,4   | 16,2   | 5,1    |
| TOTAL          | 2511,7               | 3473,8 | 3352,9 | 3146,5 | 4052,2 | 1754,2 |

Tabela 3 -- Amostras do Corte B-Método Chevron

| Malha (mm)     | Massa da amostra (g) |        |        |        |        |        |
|----------------|----------------------|--------|--------|--------|--------|--------|
| Corte B        | 1                    | 2      | 3      | 4      | 5      | 6      |
| # -25,4 + 12,7 | 1798                 | 3144   | 2366   | 1807   | 3000   | 1216   |
| # -12,7 + 6,35 | 245,8                | 1126   | 669    | 716    | 1041   | 384,9  |
| # -6,35 + 3,15 | 12,8                 | 340,7  | 290,3  | 540,1  | 522,5  | 128,9  |
| # -3,15 + 1    | 2                    | 78     | 69,3   | 224,9  | 120    | 8,2    |
| # -1 + 0,85    | 2,8                  | 23     | 17,6   | 46,2   | 26     | 3,3    |
| TOTAL          | 2061,4               | 4711,7 | 3412,2 | 3334,2 | 4709,5 | 1741,3 |

Tabela 4 -- Amostras do Corte C-Método Chevron

| Malha (mm)     | Massa da amostra (g) |        |        |        |        |        |
|----------------|----------------------|--------|--------|--------|--------|--------|
| Corte C        | 1                    | 2      | 3      | 4      | 5      | 6      |
| # -25,4 + 12,7 | 2158                 | 2604   | 1433   | 1656   | 2952   | 960    |
| # -12,7 + 6,35 | 300                  | 804    | 451,5  | 783    | 1154   | 347    |
| # -6,35 + 3,15 | 13,6                 | 236,7  | 147,8  | 397,4  | 513,1  | 79,8   |
| # -3,15 + 1    | 1,4                  | 29,3   | 21,6   | 109,4  | 43,8   | 8,3    |
| # -1 + 0,85    | 2,8                  | 15,1   | 6,4    | 26,8   | 31,9   | 3,1    |
| TOTAL          | 2475,8               | 3689,1 | 2060,3 | 2972,6 | 4694,8 | 1398,2 |

### Método Strata

Tabela 5 - Amostras do Corte A-Método Strata

| Corte A        | 1      | 2      | 3      | 4      | 5      | 6      |
|----------------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| # -25,4 + 12,7 | 1266   | 3067   | 2920   | 1599   | 1980   | 1366   |
| # -12,7 + 6,35 | 232,4  | 678    | 756    | 689    | 678    | 496    |
| # -6,35 + 3,15 | 35,2   | 170,7  | 207,5  | 299,6  | 74,8   | 155,2  |
| # -3,15 + 1    | 10,6   | 12,3   | 29,6   | 70,7   | 104,7  | 16,1   |
| # -1 + 0,85    | 3,5    | 6,8    | 7,5    | 11,1   | 30,9   | 4,8    |
| TOTAL          | 1547,7 | 3934,8 | 3920,6 | 2669,4 | 2868,4 | 2038,1 |

Tabela 6 - Amostras do Corte B-Método Strata

| Malha (mm)     | Massa das amostras (g) |       |       |       |       |      |
|----------------|------------------------|-------|-------|-------|-------|------|
| Corte B        | 1                      | 2     | 3     | 4     | 5     | 6    |
| # -25,4 + 12,7 | 1622                   | 3027  | 2414  | 2008  | 2512  | 1921 |
| # -12,7 + 6,35 | 312                    | 714   | 616   | 805   | 936   | 446  |
| # -6,35 + 3,15 | 46,7                   | 200,5 | 218,2 | 407,9 | 100,4 | 88,1 |
| # -3,15 + 1    | 5                      | 15,1  | 21,3  | 103,6 | 134,4 | 10,8 |
| # -1 + 0,85    | 2,6                    | 7,8   | 4,5   | 25    | 29,7  | 3    |



|              |        |        |      |        |        |        |
|--------------|--------|--------|------|--------|--------|--------|
| <b>TOTAL</b> | 1988,3 | 3964,4 | 3274 | 3349,5 | 3712,5 | 2468,9 |
|--------------|--------|--------|------|--------|--------|--------|

Tabela 7- Amostras do Corte C-Método Strata

| <b>Malha (mm)</b> | <b>Massa amostra (g)</b> |        |        |        |        |        |
|-------------------|--------------------------|--------|--------|--------|--------|--------|
| <b>Corte C</b>    | 1                        | 2      | 3      | 4      | 5      | 6      |
| # -25,4 + 12,7    | 896                      | 2452   | 2709   | 1620   | 2521   | 1908   |
| # -12,7 + 6,35    | 153                      | 651    | 635    | 735    | 773    | 477    |
| # -6,35 + 3,15    | 22,2                     | 131    | 240,2  | 363,8  | 473    | 126,7  |
| # -3,15 + 1       | 5,8                      | 6,7    | 21,8   | 75,7   | 149,9  | 16,4   |
| # -1 + 0,85       | 1,2                      | 5,1    | 7,2    | 15,7   | 39     | 3,7    |
| <b>TOTAL</b>      | 1078,2                   | 3245,8 | 3613,2 | 2810,2 | 3955,9 | 2531,8 |

### Método Windrow

Tabela 8 - Amostras do Corte A-Método Windrow

| <b>Malha (mm)</b> | <b>Massa da amostra (g)</b> |       |      |       |        |        |
|-------------------|-----------------------------|-------|------|-------|--------|--------|
| <b>Corte A</b>    | 1                           | 2     | 3    | 4     | 5      | 6      |
| # -25,4 + 12,7    | 1602                        | 2711  | 2828 | 2082  | 3298   | 1777   |
| # -12,7 + 6,35    | 356                         | 617   | 757  | 722,2 | 733    | 344    |
| # -6,35 + 3,15    | 96,3                        | 108,8 | 216  | 363,2 | 247,4  | 106,8  |
| # -3,15 + 1       | 2,4                         | 15,1  | 26,2 | 94,2  | 33,8   | 8,2    |
| # -1 + 0,85       | 1,9                         | 5,1   | 7,8  | 10,4  | 14,9   | 3,9    |
| <b>TOTAL</b>      | 2058,6                      | 3457  | 3835 | 3272  | 4327,1 | 2239,9 |

Tabela 9 - Amostras do Corte B-Método Windrow

| <b>Malha (mm)</b> | <b>Massa da amostra (g)</b> |       |        |        |        |        |
|-------------------|-----------------------------|-------|--------|--------|--------|--------|
| <b>Corte B</b>    | 1                           | 2     | 3      | 4      | 5      | 6      |
| # -25,4 + 12,7    | 1691                        | 3230  | 2518   | 1716   | 3858   | 1198   |
| # -12,7 + 6,35    | 387                         | 787   | 527    | 524    | 869    | 490    |
| # -6,35 + 3,15    | 75,2                        | 169,5 | 146,9  | 268,6  | 309    | 113,7  |
| # -3,15 + 1       | 2,5                         | 23,2  | 5,9    | 53,9   | 33,3   | 8      |
| # -1 + 0,85       | 2,2                         | 13,3  | 2,9    | 9,2    | 9,1    | 2,1    |
| <b>TOTAL</b>      | 2157,9                      | 4223  | 3200,7 | 2571,7 | 5078,4 | 1811,8 |

Tabela 10 -- Amostras do Corte C-Método Windrow

| <b>Malha (mm)</b> | <b>Massa da amostra (g)</b> |       |       |       |      |       |
|-------------------|-----------------------------|-------|-------|-------|------|-------|
| <b>Corte C</b>    | 1                           | 2     | 3     | 4     | 5    | 6     |
| # -25,4 + 12,7    | 1798                        | 2902  | 2129  | 1670  | 2972 | 1065  |
| # -12,7 + 6,35    | 426                         | 626   | 513   | 565   | 745  | 323,4 |
| # -6,35 + 3,15    | 92,7                        | 173,9 | 163,3 | 219,7 | 168  | 113,7 |

|              |               |               |             |               |               |               |
|--------------|---------------|---------------|-------------|---------------|---------------|---------------|
| # -3,15 + 1  | 2             | 21            | 31,6        | 57,8          | 18,3          | 13,5          |
| # -1 + 0,85  | 2,1           | 5,4           | 9,1         | 9,1           | 6,6           | 2,5           |
| <b>TOTAL</b> | <b>2320,8</b> | <b>3728,3</b> | <b>2846</b> | <b>2521,6</b> | <b>3909,9</b> | <b>1518,1</b> |

#### 4. Resultados obtidos

O método de três seções de corte foi analisado quanto ao desvio percentual. Mais informações sobre os desvios dentro de cada método podem ser encontradas no Anexo. A Tabela 11, Tabela 12 e Tabela 13 mostram as médias das porcentagens de massa distribuídas por faixa granulométrica.

##### Método Chevron

Tabela 11 - Distribuição do material no método Chevron.

|                | Distribuição Média Simples (%) |        |        |        |        |        |
|----------------|--------------------------------|--------|--------|--------|--------|--------|
|                | 1                              | 2      | 3      | 4      | 5      | 6      |
| # -25,4 + 12,7 | 87,72                          | 69,30  | 70,21  | 56,13  | 65,30  | 68,99  |
| # -12,7 + 6,35 | 11,62                          | 21,89  | 20,53  | 22,92  | 22,53  | 23,32  |
| # -6,35 + 3,15 | 0,49                           | 7,07   | 7,41   | 14,79  | 10,03  | 6,84   |
| # -3,15 + 1    | 0,06                           | 1,29   | 1,44   | 5,02   | 1,60   | 0,62   |
| # -1 + 0,85    | 0,11                           | 0,45   | 0,41   | 1,14   | 0,54   | 0,23   |
|                | 100                            | 100,00 | 100,00 | 100,00 | 100,00 | 100,00 |

##### Método Strata

Tabela 12 - Distribuição do material no método Strata.

|                | Distribuição Média Simples (%) |        |        |        |        |        |
|----------------|--------------------------------|--------|--------|--------|--------|--------|
|                | 1                              | 2      | 3      | 4      | 5      | 6      |
| # -25,4 + 12,7 | 82,16                          | 76,61  | 74,40  | 59,17  | 66,81  | 73,40  |
| # -12,7 + 6,35 | 14,97                          | 18,43  | 18,56  | 25,33  | 22,80  | 20,41  |
| # -6,35 + 3,15 | 2,23                           | 4,48   | 6,20   | 12,12  | 5,76   | 5,40   |
| # -3,15 + 1    | 0,49                           | 0,30   | 0,67   | 2,81   | 3,69   | 0,63   |
| # -1 + 0,85    | 0,16                           | 0,18   | 0,18   | 0,57   | 0,95   | 0,17   |
|                | 100                            | 100,00 | 100,00 | 100,00 | 100,00 | 100,00 |

##### Método Windrow

Tabela 13 - Distribuição do material no método Windrow.

|                | Distribuição Média Simples (%) |        |        |        |        |        |
|----------------|--------------------------------|--------|--------|--------|--------|--------|
|                | 1                              | 2      | 3      | 4      | 5      | 6      |
| # -25,4 + 12,7 | 77,89                          | 77,58  | 75,74  | 65,53  | 76,07  | 71,87  |
| # -12,7 + 6,35 | 17,86                          | 17,76  | 18,08  | 21,62  | 17,70  | 21,24  |
| # -6,35 + 3,15 | 4,05                           | 3,94   | 5,32   | 10,09  | 5,37   | 6,18   |
| # -3,15 + 1    | 0,11                           | 0,52   | 0,66   | 2,42   | 0,63   | 0,57   |
| # -1 + 0,85    | 0,09                           | 0,20   | 0,20   | 0,35   | 0,23   | 0,15   |
|                | 100                            | 100,00 | 100,00 | 100,00 | 100,00 | 100,00 |

Através das frequências médias obtidas e da suposição de dois extremos de  $P_{0,01\%} = 0,85 \text{ mm}$  e  $P_{100\%} = 25,4\text{mm}$ , foram construídos os gráficos de distribuição granulométrica de cada seção.

Os gráficos tratam-se de distribuições granulométricas acumuladas em escala logarítmica em porcentagem devido a baixa quantidade de material mais fino.

Método Chevron:

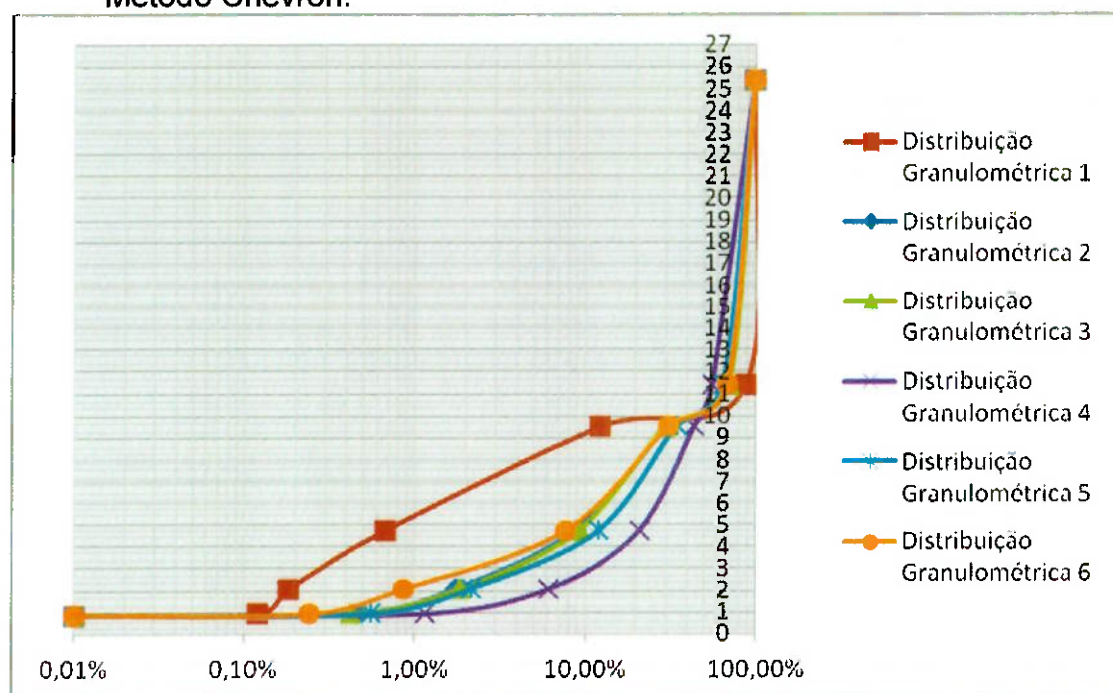


Figura 29 - Gráfico de distribuição granulométrica acumulada - método Chevron.

- Método Strata:



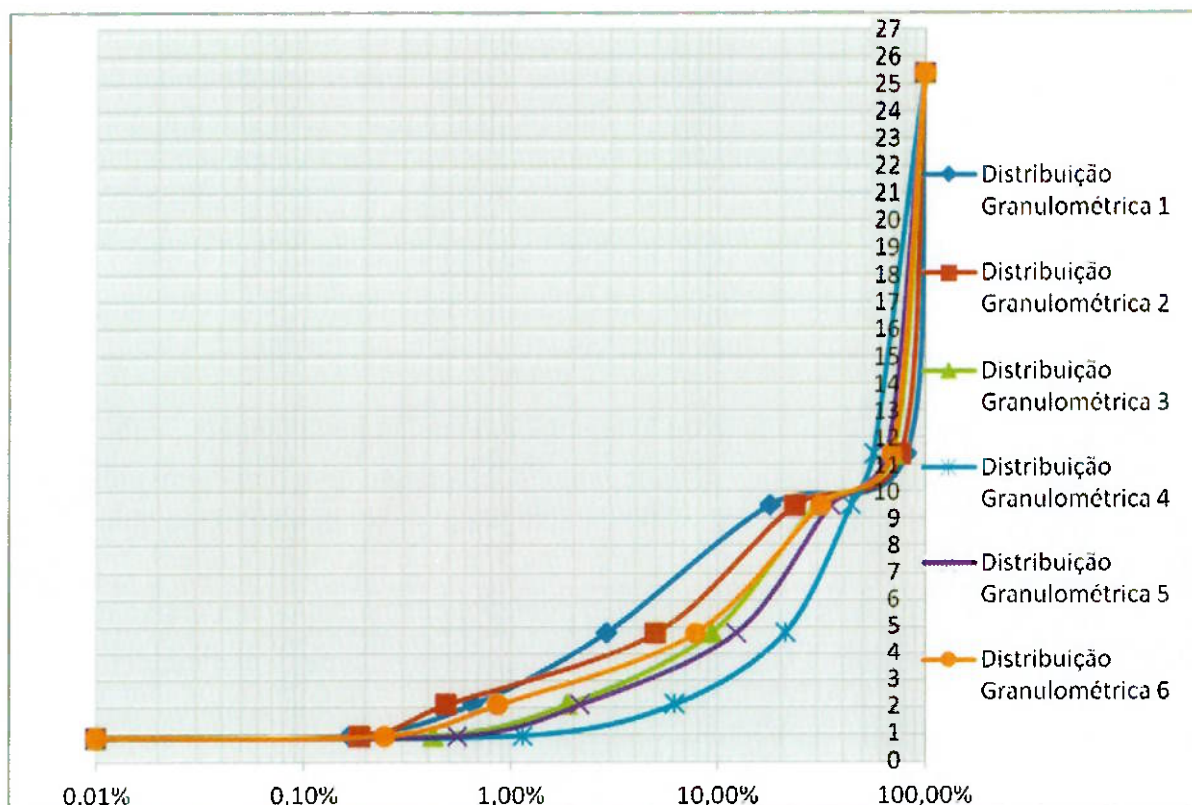


Figura 30 -Gráfico de distribuição granulométrica acumulada - método Strata.

- Método Windrow:

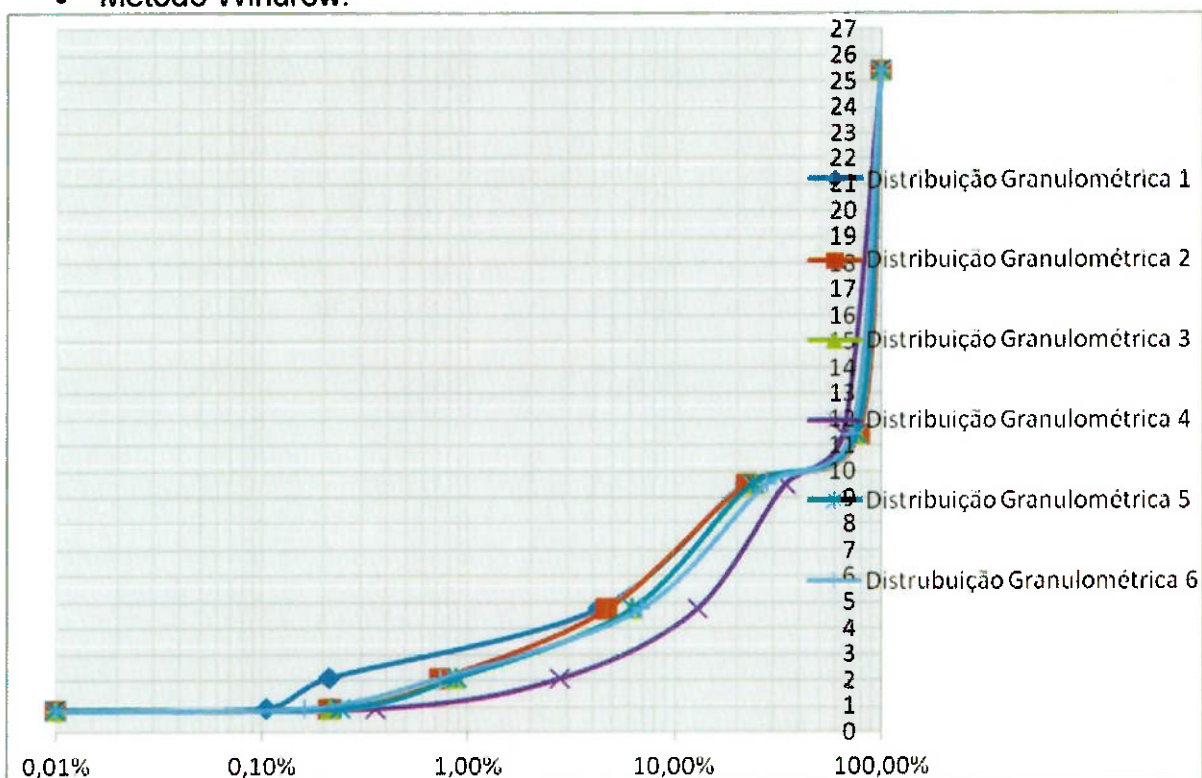


Figura 31 - Gráfico de distribuição granulométrica acumulada - método Windrow.

A partir dos gráficos foram obtidos os dados de porcentagem versus granulometria. Assim foi possível determinar os D 0,1% a D50% do material em cada seção para cada tipo de empilhamento. Neste caso, os gráficos tratam-se apenas de uma ferramenta qualitativa de comparação entre os métodos. As tabelas a seguir também são ferramentas de comparação, no entanto quantitativas, onde D1% representa, por exemplo, a malha em mm, na qual passa 1% do material para cada seção.

#### Método Chevron

Tabela 14 - Tamanho de cada faixa da distribuição granulométrica.

|         | Malha (mm) |       |      |       |       |       |
|---------|------------|-------|------|-------|-------|-------|
|         | 1          | 2     | 3    | 4     | 5     | 6     |
| D 0,01% | 0,85       | 0,85  | 0,85 | 0,85  | 0,85  | 0,85  |
| D 0,1%  | 0,9        | 0,865 | 0,87 | 0,855 | 0,86  | 0,885 |
| D 0,5%  | 4,15       | 1,355 | 0,95 | 0,86  | 0,865 | 1,4   |
| D 1%    | 5,35       | 2,25  | 1,35 | 0,87  | 1,2   | 2,25  |
| D 5%    | 8,25       | 4     | 3,55 | 1,9   | 3,1   | 4     |
| D 10%   | 9,15       | 5,35  | 5,1  | 2,8   | 4,25  | 5,4   |
| D 50%   | 10,35      | 10,3  | 10,3 | 10,25 | 10,3  | 10,25 |
| D100%   | 25,4       | 25,4  | 25,4 | 25,4  | 25,4  | 25,4  |

- Método Strata

Tabela 15 - Tamanho de cada faixa da distribuição granulométrica.

|         | Malha (mm) |       |       |      |       |       |
|---------|------------|-------|-------|------|-------|-------|
|         | 1          | 2     | 3     | 4    | 5     | 6     |
| D 0,01% | 0,85       | 0,85  | 0,85  | 0,85 | 0,85  | 0,85  |
| D 0,1%  | 0,9        | 0,885 | 0,885 | 0,86 | 0,855 | 0,885 |
| D 0,5%  | 1,7        | 2,1   | 0,95  | 0,88 | 0,9   | 1,35  |
| D 1%    | 2,7        | 2,8   | 1,3   | 0,9  | 1,15  | 2,2   |
| D 5%    | 6,15       | 4,75  | 3,45  | 1,8  | 3,1   | 4     |
| D 10%   | 8,1        | 6,6   | 4,95  | 2,8  | 4,25  | 5,4   |
| D 50%   | 10,4       | 10,4  | 10,3  | 10,3 | 10,3  | 10,4  |
| D100%   | 25,4       | 25,4  | 25,4  | 25,4 | 25,4  | 25,4  |

- Método Windrow

Tabela 16 - Tamanho de cada faixa da distribuição granulométrica.

|         | Malha (mm) |      |      |      |       |      |
|---------|------------|------|------|------|-------|------|
|         | 1          | 2    | 3    | 4    | 5     | 6    |
| D 0,01% | 0,85       | 0,85 | 0,85 | 0,85 | 0,85  | 0,85 |
| D 0,1%  | 0,925      | 0,89 | 0,89 | 0,88 | 0,885 | 0,92 |
| D 0,5%  | 2,75       | 1,55 | 1,4  | 1    | 1,35  | 1,7  |
| D 1%    | 3,25       | 2,5  | 2,25 | 1,25 | 2,25  | 2,4  |
| D 5%    | 5          | 4,85 | 4,3  | 2,8  | 4,3   | 4,15 |
| D 10%   | 7          | 7,05 | 6,1  | 4,1  | 6,25  | 5,75 |
| D 50%   | 10,4       | 10,4 | 10,4 | 10,4 | 10,4  | 10,4 |

|       |      |      |      |      |      |      |
|-------|------|------|------|------|------|------|
| D100% | 25,4 | 25,4 | 25,4 | 25,4 | 25,4 | 25,4 |
|-------|------|------|------|------|------|------|

Obtidos tais resultados, os métodos já podem ser comparados. O fator de segregação será discutido e determinado mais adiante, formalizando as conclusões obtidas.

## 5. Discussão dos resultados

A análise e discussão dos resultados foi conduzida da seguinte forma:

- Análise das seções em cada método e comportamento das partículas e distribuição nos métodos, e
- Comparação dos métodos e do estudo comparativo de segregação nas pilhas.

Para facilitar a interpretação dos dados, criou-se a seguinte nomenclatura de distribuição de tamanhos de partículas, somente com o intuito de tornar a linguagem mais simples.

Tabela 17 – Nomenclatura das faixas granulométricas.

| Malha (mm)     |                |
|----------------|----------------|
| # -25,4 + 12,7 | Muito grossos  |
| # -12,7 + 6,35 | Grossos        |
| # -6,35 + 3,15 | Intermediários |
| # -3,15 + 1    | Finos          |
| # -1 + 0,85    | Muito finos    |

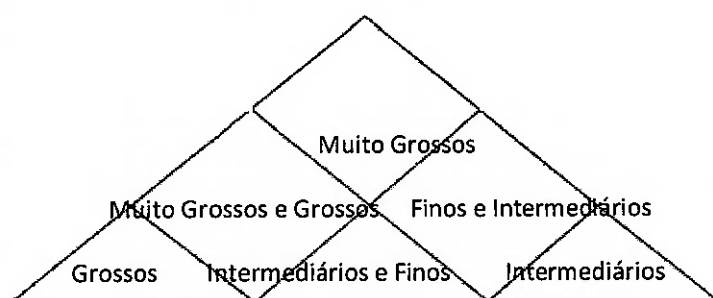
O primeiro método analisado foi o Chevron. A análise da Tabela 11 e do gráfico da Figura 29, indicou maior presença de grossos na seção 1 seguida da seção 3, sendo a seção 4 aquela com maior presença de finos. O esquema abaixo mostra prevalência, de cada fração granulométrica em cada seção da pilha. É obtida para a pilha construída segundo o método Chevron.



Através do gráfico da Figura 30 pode-se observar que as curvas são relativamente esparsas, o que indica segregação relativamente alta do material, ou seja, cada seção apresenta uma distribuição granulométrica distinta, com exceção das seções 3,5 e 6 que apresentam curvas bem próximas. A explicação para isto decorre de que partículas menores contam com menor momento de inércia e caem

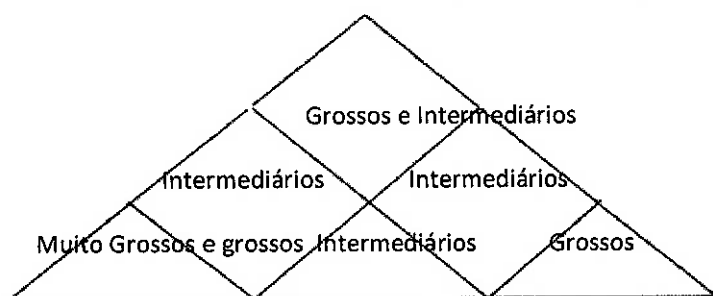
mais próximo ao ponto de descarga (seção 4 e 6), afinal não possuem energia ou momento para atingir a seção 1.

O empilhamento do método Strata foi analisado, com o auxílio da Tabela 12, onde se nota a maior presença de grossos se dá na seção 1 seguida da seção 2. Já os finos se apresentam mais na seção 5 do que na seção 4, o que não ocorre no método Chevron. O esquema abaixo mostra prevalência, de cada fração granulométrica em cada seção da pilha.



As curvas do gráfico da Figura 30 exibem comportamento esparsos, no entanto seguem o mesmo perfil, indicando um comportamento similar de distribuição granulométrica, o efeito dos finos deixa as curvas 4 e 5 mais baixas, indicando que estas possuem mais material com menor granulometria em relação as outras seções.

Quanto ao empilhamento Windrow, a Tabela 13 mostra que a porcentagem de grossos é muito próxima em todas seções, com a exceção da seção 4. Em relação aos semifinos 4 e 6 detém a maioria e os finos se concentram quase que totalmente na seção 4. Um esquema da pilha pode ser gerado:



As curvas no gráfico da Figura 31 são pouco esparsas desviando um pouco o limite da curva 1 por possuir característica mais grosseira e a curva 4 por possuir característica mais fina. O empilhamento Windrow de forma preliminar mostra ser aquele com a distribuição menos segregada.

A maneira selecionada para comparar quantitativamente os métodos propostos foi a análise da porcentagem média total em cada um dos métodos, obter a variância total, bem como o desvio de cada método em relação ao material que o compõe.

A média comparativa trata-se da média entre os cortes, caso as seções fossem granulometricamente distribuídas de maneira homogênea.

A média comparativa é o que se esperava daquela faixa granulométrica, se o material fosse inteiramente homogêneo.

A variância comparativa é a somatória das diferenças ao quadrado da média percentual de cada faixa na amostra como um todo e de cada seção (1,2,3,4,5 e 6). A raiz da somatória destas variâncias determina o desvio comparativo de cada método, que foi denominado pelo autor como fator de segregação.

Ou seja, para cada corte, obteve-se a distribuição granulométrica geral, excluindo-se a ideia de seção, e posteriormente, para cada método, obteve-se a média entre os três cortes. Se não houvesse segregação granulométrica, a distribuição esperada nos cortes seria esta, muito parecida com a alíquota extraída logo após a britagem na Tabela 1. No entanto, em cada uma das seções estudadas havia uma variação da porcentagem para cada uma dessas faixas granulométricas. A partir deste fato, calculou-se a somatória destas variações ao quadrado entre a média comparativa e as seções 1, 2, 3, 4, 5 e 6.

O desvio comparativo ou fator de segregação é a raiz da soma de todas as variâncias comparativas. E este é o fator que indica quanto o método varia em relação a segregação.

- Método Chevron

Tabela 18-Tabela de obtenção do desvio comparativo.

|                | <b>Média Comparativa (%)</b> | <b>Variância Comparativa</b> |                    |
|----------------|------------------------------|------------------------------|--------------------|
| # -25,4 + 12,7 | 69,61                        | 0,052930                     |                    |
| # -12,7 + 6,35 | 20,47                        | 0,009875                     |                    |
| # -6,35 + 3,15 | 7,77                         | 0,010896                     |                    |
| # -3,15 + 1    | 1,67                         | 0,001511                     |                    |
| # -1 + 0,85    | 0,48                         | 0,000064                     | Desvio Comparativo |
| <b>Total</b>   | 100,00                       | -                            |                    |
| -              | -                            | 0,015055                     | <b>0,122699</b>    |

- Método Strata

Tabela 19 -Tabela de obtenção do desvio comparativo.



|                | Média Comparativa (%) | Variância Comparativa |                    |
|----------------|-----------------------|-----------------------|--------------------|
| # -25,4 + 12,7 | 72,09                 | 0,032384              |                    |
| # -12,7 + 6,35 | 20,08                 | 0,006627              |                    |
| # -6,35 + 3,15 | 6,03                  | 0,005441              |                    |
| # -3,15 + 1    | 1,43                  | 0,001039              |                    |
| # -1 + 0,85    | 0,37                  | 0,000055              | Desvio Comparativo |
| Total          | 100,00                | -                     |                    |
|                | -                     | 0,009109              | 0,095441           |

- Método Windrow

Tabela 20 -Tabela de obtenção do desvio comparativo.

|                | Média Comparativa (%) | Variância Comparativa |                    |
|----------------|-----------------------|-----------------------|--------------------|
| # -25,4 + 12,7 | 74,11                 | 0,011145              |                    |
| # -12,7 + 6,35 | 19,04                 | 0,001722              |                    |
| # -6,35 + 3,15 | 5,82                  | 0,002543              |                    |
| # -3,15 + 1    | 0,82                  | 0,000329              |                    |
| # -1 + 0,85    | 0,20                  | 0,000004              | Desvio Comparativo |
| # -25,4 + 12,7 | 100,00                | -                     |                    |
|                |                       | 0,003149              | 0,056112           |

O método Windrow apresentou o menor valor do Fator de Segregação, indicando assim ser o método que apresentou, para as condições ensaiadas, a menor segregação granulométrica no empilhamento. Métodos Strata e Chevron apresentaram valores progressivamente maiores valores de Fator de Segregação, indicando assim segregações também maiores.

## Conclusão

Através do trabalho apresentado e da metodologia estabelecida e realizada, pode-se concluir que o estudo comparativo de segregação em pilhas foi realizado com sucesso.

Notou-se a presença de segregação com maior assiduidade em pilhas Chevron, como se era de esperar, pois este método de empilhamento trata-se do menos cuidadoso em relação ao manuseio de material. Este também é o método que mais teve variabilidade entre os cortes. Trata-se de um método de difícil constância de valores e deve ser evitado quando processos necessitam de elevada homogeneidade granulométrica. No entanto, como estudado, trata-se também do método mais barato, necessitando apenas de stacker com torre fixa e lança de menor comprimento com um custo total de instalação mais baixo, além de economia de energia.

Quanto ao método Strata, pode ser tratado como intermediário entre ambos, pois não apresenta altas variações de segregação e trata-se de um método relativamente mais barato que Windrow, sendo apenas caracterizado por um alto custo energético, mas podendo utilizar equipamento de manuseio relativamente simples. No estudo teórico, este método apresenta baixa empregabilidade na indústria devido a inconstante homogeneização de teores que apresenta, o que leva a variação de teores em lotes que alimentam as usinas. Se a homogeneização de teores não for fator crucial, este método pode ser aplicado.

Sobre o método Windrow, pode-se apresentar algumas vantagens vivenciadas ao se construir a pilha. Trata-se de um método bastante fácil de controlar, caracterizado por alta densidade da pilha e aumento da sua capacidade volumétrica, mas também é um método trabalhoso. Este método é um dos mais caros, pois há um alto custo adquirido com gastos energéticos, além do equipamento ter necessidade de ser basculável e giratório, necessitando de grau elevado de automação, o que aumenta os custos de implantação deste método.

Obtiveram-se resultados muito bons na prática, o que demonstra que esta metodologia desenvolvida para o estudo pode ser aplicado em larga escala e também para outros métodos de empilhamento. A idealização do gabarito ou dispositivo de corte foi concebida pela autora auxiliada pelo orientador e pelo técnico Sr. Altair. O estudo estatístico das amostras foi realizado pela autora, baseada na literatura de Variabilidade de teores na concepção de pilhas. Trata-se de um novo método a ser aplicado para estudo de segregação granulométrica em pilhas na Engenharia de Minas.

## **Referências Bibliográficas**

- 1.Chaves, A. P. **Manuseio de sólidos granulares**. Ed. 1. São Paulo. Editora Signus. 2011. 336p.
2. FERREIRA, M.F. **Otimização do projeto de pátio de homogeneização através do método de simulação condicional**. São Paulo: Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, 1989. 116p..
3. Schofield C. J. **Homogeneization and Blending Systems Design**. Ed 1. Trans Tech Pubn. 1983. 315p.
4. P. Massaci, G. Raspa, C. da Rold. **Homogeneization of raw material by production planning and storage systems**. 19 th APCOM Symposium. P 637-647.
- 5.Nohl J. P.E.,Domnick B. **Stockpile Segregation**. United States of America. 2002. 21p.
- 6.Brock, J.D., May, J. G, Renegar, G. **Segregation: Causes and Cures**. United States of America. 2003. 25 p.

## **Anexo A**

A ideia deste Anexo é trazer informações que embora sejam relacionadas ao trabalho, não fazem parte do escopo de estudos. No entanto, criteriosamente, são informações importantes para um estudo mais aprofundado sobre empilhamento.

### **1. Outros métodos de Empilhamento**

#### **Método Cone Shell**

O stacker forma um cone inicial. Então move-se para a frente, estaciona e começa a descarregar o material sobre a superfície do cone inicial até atingir a cota máxima. Então, move-se novamente para a frente e repete a operação tantas vezes quantas necessário até chegar à extremidade da pilha.

As pilhas são construídas a partir de um cone inicial. A empilhadeira avança a passos consecutivos e estaciona, depositando novas camadas sucessivamente sobre uma das faces do cone resultante. Esta camada tem a forma de uma concha e é depositada sobre o semicone da extremidade da pilha, como uma concha. Os trechos de movimentação são curtos e são feitas paradas sucessivas para formação dos semicones.



Figura 32 - Pilha do método cone Shell.

Tal método apresenta a vantagem de movimentação da stacker apenas uma vez ao longo da pilha. A degradação granulométrica só é sensível no cone inicial, pois nas outras posições o material é despejado sobre o cone anterior. O equipamento é extremamente simples, com a lança completamente fixa sem movimento nem sequer na vertical.

Como desvantagem o método prevê mínima homogeneização, embora se afirme conseguir alguma a custa de complicações no manuseio. O método cone Shell é geralmente usado com slot Bin e quando a retomada é feita por baixo e existem vários alimentadores, acionando-se vários deles ao mesmo tempo, ocorre a mistura do material e a heterogeneidade diminui.

#### **Método Six Row**

Trata-se de um método intermediário entre Chevron e Windrow com a tentativa de combinar as vantagens. São construídas três pequenas pilhas pequenas lado a lado na base, e posteriormente três empilhadas consecutivamente, de forma a completar a seção transversal triangular da pilha

Assim como no método Windrow a segregação é diminuída e melhor distribuída ao longo da seção transversal, no entanto o método ainda acarreta as suas desvantagens, no entanto, diminuídas e o equipamento é necessariamente aquele utilizado para empilhamento Windrow, ou seja, o mais caro.



Figura 33- Método de empilhamento Six Row

### Método Multichevron

Trata-se de um método intermediário entre o Chevron e o Six Row, constitui em construir seis pilhas Chevron, onde se construiria seis pilhas Six Row, obtém-se melhor homogeneização, maior facilidade operacional e correção.



Figura 34 - Método de Empilhamento multichevron.

## **2. Outros equipamentos para Retomada**

### Retomada da face lateral da pilha

Há a exigência de pequena e média variabilidade no produto (até 1:8), pode –se utilizar o sistema de empilhamento Strata e neste caso o retomador utilizado é colocado lateralmente a pilha. Tais equipamentos são compostos por uma cadeia de lâminas que ao se movimentar desagrega o material da face da pilha, jogando-o num transportador de correia.

Os principais tipos de equipamento são:

- Retomador de pórtico
- Retomador lateral
- Retomador de semipórtico
- Dois raspadores

Os raspadores atuam continuamente sobre as faces laterais das pilhas e se deslocam na direção longitudinal, ao fim de cada passagem a cadeia de raspadores é rebaixada e o sentido de translação é revertido. É uma máquina com grande facilidade de automação, mas possui pequena capacidade de operação e não opera com materiais muito densos ou abrasivos. São aplicáveis até larguras de pilhas de 25 a 30m e capacidade de extração de 1500 t/h.

Para pilhas maiores e que nem necessitam de maior capacidade de retomada, os retomadores de pórtico são as máquinas mais indicadas, especialmente porque tem característica de maior confiabilidade, economia e utilização efetiva do espaço.



O método de trabalho é similar ao dos raspadores, sendo necessária a colocação de trilhos dos dois lados da pilha, a sua estrutura em forma de portal serve de guia para lança com a cadeia de lâminas raspadeiras. Em alguns casos pode haver duas cadeias de raspadores, ambas fixas ao portal por meio de articulações, havendo uma corrente principal que escava 80 a 90 % do volume da pilha, e outra secundária que alimenta o material restante, para que a principal se coloque sobre o transportador de correia. O uso de duas cadeias de raspadores resulta em uma economia de 25% com vistas ao tempo total de retomada da pilha.

O retomador de portal é uma alternativa para sistemas cobertos, pois não necessita de contra-peso. O seu limite de capacidade de extração é de aproximadamente 3000 t/h com larguras de vão de até 60m. Os sistemas de semiportal são intermediários entre os anteriores e são bastante aplicados a empilhamentos cobertos.

#### Retomada da face da seção transversal da pilha - Scrappers

- Retomador de Ponte com raspador (Bridge Scraper Reclaimer):

Este equipamento é composto por um sistema de ancinhos colocados paralelamente a seção transversal da pilha, e perpendicularmente ao eixo da pilha. O movimento da grade de ancinhos desagrega o material e o faz cair para a base da pilha, e então é carregado por um transportador de arraste que o leva até um transportador de correia colocado no eixo longitudinal da pilha. Há três possibilidades de arranjo do equipamento relativos a posição do transportador de arraste:

- O transportador de correia se situa a um nível abaixo do terreno.
- Outro arranjo, o transportador está ao nível do terreno, mas a pilha e o retomador estão numa plataforma elevada.
- Um dos extremos do raspador é elevado de forma a fazer com que o material suba até um transportador de correia colocado no nível do terreno.

Este equipamento permite um bom efeito de homogeneização devido ao fato de a grade de ancinhos retomar toda a face da pilha e ao efeito de mistura do material, pelo movimento das lâminas de transportador de arraste. Assim, tem-se resultados de homogeneização melhores do que em outros tipos de equipamento e a segregação granulométrica das partículas torna-se de menor importância.

As desvantagens de retomador de ponte são:

- A necessidade de um túnel ou paredes de concreto.
- A capacidade de extração de 500 t/h é bastante limitada.
- Os custos de manutenção são mais altos do que dos outros tipos de máquinas, operando com minerais altamente abrasivos.



Figura 35 - Retomador de Ponte com raspador usado em cimenteiras.

- Retomador de Tambor:

Neste equipamento, o tambor ataca toda a largura da pilha de uma só vez, ao invés de uma roda de caçambas, e dentro dele existe um transportador de correia e um sistema de ancinhos desagrega o material da pilha, avançando continuamente na direção longitudinal.

Trata-se de um equipamento de grande capacidade, sendo usado em grandes pilhas de homogeneização (de até 120000t) com capacidade de retomada de 3000t/h. Este equipamento requer pouca manutenção e tem alta disponibilidade. No retomador de tambor não há formação de ciclos de variação, e quanto maior a área da pilha, menor é a variação do material. A única desvantagem deste equipamento é o alto investimento necessário.



Figura 36 - Retomador de tambores da Tyssen Krupp.

- Retomador de disco

Trata-se de uma estrutura rotativa em forma de disco suportada por uma ponte que cobre toda a largura da pilha. As estruturas que suportam os dois extremos, permitem o movimento na direção longitudinal.

Há a necessidade de pouca potência de operação dada pelo conjunto disco/ponte poder se inclinar de forma o eixo de rotação coincidir com o centro de massa, diminuindo o momento de inércia. O ângulo em relação a horizontal da ponte varia de 0° a 50°. O sistema todo avança a uma velocidade constante, ajustável e que regula a vazão de retomada.

O funcionamento consiste em agitar as partículas da face da pilha através do movimento do disco em relação à face, fazendo assim elas rolar e recolher o material na borda do disco, onde o material flui para um transportador de correia.

Segundo Schofield [3], existem algumas vantagens deste equipamento em relação aos outros apresentados.

- O equipamento consiste de peça única para mistura, recolhimento e transporte o que nos outros é realizado por aproximadamente três grandes peças, além disso o movimento é simples, somente de rotação.
- O disco funciona como ótimo homogeneizador já que retoma e descarrega toda a face da pilha de uma só vez.
- Não constitui ciclos de variação e trabalha continuamente.
- Necessita de espaço reduzido para acomodar o retomador, resultando em economia de área de projeto.
- Consegue até certo ponto, reduzir a variabilidade dos cones extremos da pilha longitudinal.
- A capacidade de produção do retomador de disco é tão boa quanto a de qualquer outro retomador.
- Requer pouca manutenção.



Figura 37 - Retomador de disco.

### 3. Problemas presentes no Empilhamento

Existem diversos problemas que podem ser apresentados quando tratamos de empilhamento, estes então serão apresentados e devem ser levados em conta na operação das pilhas.

#### Desprendimento de Poeiras

As poeiras são um dos problemas mais encontrados. Podem ser também um dos mais sérios, dado que haverá perda de massa e esta perda além do mais, pode ser seletiva, ou seja, partículas mais finas podem ter características diferentes da média populacional.



Figura 38 - Controle de operação da VALE para conter poeiras.

Existem maneiras de diminuir este acontecimento, que em muitas ocasiões devem ser implementadas em conjunto:

- Alinhamento das pilhas em relação aos ventos locais há a minimização da seção transversal ao fluxo de vento, fazendo com que haja a diminuição das perdas.

- Construção do pátio a jusante de edifícios e instalações é um método prático para diminuir a expressividade dos ventos nas pilhas, pois a formação de barreiras ajuda a diminuir a velocidade dos mesmos.
- Uso de chutes telescópico e sanfonado nas pontas das lanças para que a descarga não sofra influência dos ventos.
- Uso de barreiras verdes nos limites dos pátios, com árvores de rápido crescimento como eucaliptos e pinus e arbustos como o sansão do campo ou cedrinho.
- Aspersão de água através de névoa de água nos pontos de transbordo (pontos de transferência de transportadores de correia, pontos de descarga e tombamento), deve-se tomar cuidado com esta prática, pois muitas vezes a umidade é indesejável.

#### Contaminação das águas superficiais

A presença da água da chuva pode não somente arrastar material como também dissolve-lo e arrasta-lo para rios, por isso para o projeto do pátio de empilhamento, a drenagem das águas pluviais do pátio deve ser feita e as águas recolhidas num sump, de onde serão bombeadas para uma estação de tratamento.

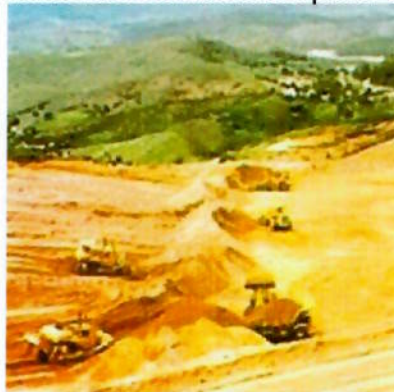


Figura 39 - Contaminação de solo e águas pluviais por metais pesados.

#### Contaminação das águas subterrâneas

Metais como cobre ou urânio, minerais sulfetados ou portadores de elementos tóxicos como o arsênio, que sejam solúveis podem atingir as correntes subterrâneas e por isso, nestes casos as pilhas devem ser constituídas de bases impermeáveis e as canaletas de drenagem devem operar com total eficiência.

#### Degradação granulométrica

É não só um problema decorrente da altura de lançamento das partículas, que caem de uma altura muito alta e tendem a fragmentar no piso, como também partículas tendem a ser esmagadas por suas camadas superiores. São apresentadas algumas maneiras de mitigar este acontecimento:

- Uso de escada de pedra ou calhas em espiral na ponta da lança que servem como barreiras e/ou amortização da velocidade da queda das partículas.
- Projeto de pilha envolvendo a altura máxima em relação à resistência a compressão das partículas na base.



### Compactação

Certos materiais coesivos como carvão betuminoso ou minério de ferro fino e úmido, quando sofrem esforços de compressão tendem a formar placas ou briquetes que são impossíveis de remover.

### Umidade

O empilhamento de material úmido pode acarretar problemas de manuseio durante o empilhamento e também afetar a estrutura da pilha, além de problemas de entupimento das caçambas e chutes. Isso somente acontece se o material se torna líquido, plástico ou coesivo durante o molhamento. A fim de evitar tais ocorrências é possível a cobertura das pilhas ou a adição de produtos químicos aderentes a superfície do minério que facilitam seu desaguamento e impedem que pancadas de chuva aumentem sua umidade.

### Morto

Em pilhas com retomada por baixo, uma parcela considerável do volume não escoam e forma assim, o morto. A solução apresentada é periodicamente rearrumar as pilhas, forçando o escoamento do morto. Além de perda de capacidade da pilha, há a ampliação do efeito de segregação granulométrica, já que os grãos maiores escoam para a saia da pilha e não são descarregados.



Figura 40 - Retomada por baixo da pilha e acúmulo de material nas bordas.

### Semi-cones

Sobre as pontas das pilhas alongadas podemos dizer que são semi-cones e o processo de homogeneização ou blendagem não ocorrem, tratam-se de depósitos perturbados. A fim de solucionar este problema são apresentadas tais práticas:

- Abandonar as pontas, deixando dois mortos no pátio. As pilhas construídas entre esses mortos não terão pontas, que introduzam danos na homogeneização;
- Retomar os semi-cones e redistribuí-los sobre a pilha;
- Durante a retomada, dirigir o material para outra pilha, não o enviando para o destino;
- Usar o procedimento de retomar uma das pontas para outra pilha, aproveitando-a e no fim da retomada, encaminhar a segunda ponta somente para outra pilha.
- Uso de pilhas com uma razão de comprimento e largura maior que cinco faz com que o efeito das pontas possa ser desprezado para o efeito de homogeneização.





Figura 41 – Presença de semi-cones nas pilhas.

#### **4. Lay Out de Pátios**

Os lay-outs básicos correspondem a disposição das pilhas paralelas umas as outras ou alinhadas. Cada configuração tem suas vantagens e limitações. E na prática os pátios consistem em combinações destes dois.

##### Pilhas paralelas

Existem diferentes arranjos possíveis, que dependem principalmente do número de equipamentos e do número de pilhas possíveis. Desde o fim da retomada de uma pilha até o começo da retomada da outra, a retomadora pode ser transportada com o auxílio de um carro de transferência, operação que leva em média 45 minutos.

Em relação a retomadores de lança e caçamba é inaplicável tal operação, dado que são equipamentos muito pesados. O stacker não pode ser transferido de uma linha a outra, pois o transportador de correia passa através dele. Cada pilha precisa de um transportador de correia para sua retomada.

As composições possíveis para um pátio de homogeneização com duas pilhas seriam, um stacker com o transportador de correia cativo e um ou dois reclaimers: um para cada pilha ou um para as duas pilhas, sendo transportado por uma carro de transferência para o outro lado, mas com vias de transportador de correias independentes para cada pilha.

Com um stacker e um reclaimer e apenas um transportador de correia é possível a configuração de retomada e empilhamento ao mesmo tempo, no entanto, só é possível para pilha coneshell. A possibilidade de um stacker reclaimer colocado entre as duas pilhas é bastante simplificador do pátio.

Uma configuração de quatro pilhas se torna possível através da adoção de dois stackers entre duas pilhas e um ou dois reclaimers que podem ser transportados pelo carro de transferência. Uma alternativa seria o uso da “escrava” que torna possível o material a ser estocado passar por cima de uma pilha já construída. Essas configurações torna possível maior área de estocagem, onde o comprimento das pilhas é limitado.

### Pilhas alinhadas

As pilhas são dispostas com as faces de suas seções transversais uma de frente para a outra, com uma empilhadeira de braço fixo e um retomador que opera em duas direções, partindo do ponto central da instalação.

As vantagens são o comprimento da pilha, que aumenta sua capacidade, mas só pode ser aplicado se não houver restrições quanto ao comprimento do terreno. O stacker com braço fixo requer um investimento menor, e o tempo de transferência do retomador de uma pilha para a outra é diminuído. Os trilhos e os carros de transferência são desnecessários e a operação tanto quanto as instalações são mais simples.

### Pilhas circulares

Uma empilhadeira giratória pode ser utilizada com braço de movimento vertical e os retomadores podem ser quaisquer um dos retomadores apresentados. Há a necessidade de uma moega de descarga do material e o transportador de correia para a retirada do material retomado.

Os métodos de empilhamento possíveis são todos apresentados nas pilhas alongados. O método chevron neste caso, evidencia alta credibilidade de homogeneização. As pilhas podem ser projetadas através das necessidades de:

- Estoque mínimo.
- Necessidade de homogeneização requerida.

Comparando-se as pilhas circulares e longitudinais, pode-se afirmar:

- Transportadores de correia para o empilhamento e retomada são mais curtos;
- Menor potência instalada para o stacker e os retomadores
- Os custos de operação e manutenção são mais baixos
- O fluxo de saída costuma ser mais contínuo do que em pilhas longitudinais, devido ao efeito de retomada dos cones e mudança do retomador, o que é bastante apreciável para operação pré-usina.
- Os investimentos totais são menores que os investimentos para pilhas longitudinais, no entanto, o custo das obras civis costuma ser maior.
- O arranjo físico se torna mais flexível no pátio dado que o fluxo pode ser qualquer no raio de 360°
- Permite a cobertura da pilha em condições mais econômicas e oferecem economia de espaço em relação as pilhas longitudinais.

## Apêndice A

Foi feito um estudo para analisar os erros e desvios de amostragem obtidos no ensaio experimental os três cortes A, B e C. Com isso analisaram-se os cortes nos três métodos e obtiveram-se os resultados seguintes:

- Distribuição percentual de cada corte e erro:

### Método Chevron

| Corte A            | 1       | 2       | 3       | 4       | 5       | 6       |
|--------------------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|
| # -25,4mm + 12,7mm | 88,78%  | 70,59%  | 71,73%  | 58,48%  | 69,32%  | 68,46%  |
| # -12,7mm + 6,35mm | 10,81%  | 19,98%  | 20,07%  | 20,94%  | 20,90%  | 23,03%  |
| # -6,35mm + 3,15mm | 0,29%   | 7,56%   | 6,54%   | 14,82%  | 8,05%   | 7,42%   |
| # -3,15mm + 1 mm   | 0,03%   | 1,42%   | 1,26%   | 4,64%   | 1,33%   | 0,80%   |
| # -1 mm + 0,85 mm  | 0,08%   | 0,45%   | 0,40%   | 1,13%   | 0,40%   | 0,29%   |
|                    | 100,00% | 100,00% | 100,00% | 100,00% | 100,00% | 100,00% |
| Corte B            | 1       | 2       | 3       | 4       | 5       | 6       |
| # -25,4mm + 12,7mm | 87,22%  | 66,73%  | 69,34%  | 54,20%  | 63,70%  | 69,83%  |
| # -12,7mm + 6,35mm | 11,92%  | 23,90%  | 19,61%  | 21,47%  | 22,10%  | 22,10%  |
| # -6,35mm + 3,15mm | 0,62%   | 7,23%   | 8,51%   | 16,20%  | 11,09%  | 7,40%   |
| # -3,15mm + 1 mm   | 0,10%   | 1,66%   | 2,03%   | 6,75%   | 2,55%   | 0,47%   |
| # -1 mm + 0,85 mm  | 0,14%   | 0,49%   | 0,52%   | 1,39%   | 0,55%   | 0,19%   |
|                    | 100,00% | 100,00% | 100,00% | 100,00% | 100,00% | 100,00% |
| Corte C            | 1       | 2       | 3       | 4       | 5       | 6       |
| # -25,4mm + 12,7mm | 87,16%  | 70,59%  | 69,55%  | 55,71%  | 62,88%  | 68,66%  |
| # -12,7mm + 6,35mm | 12,12%  | 21,79%  | 21,91%  | 26,34%  | 24,58%  | 24,82%  |
| # -6,35mm + 3,15mm | 0,55%   | 6,42%   | 7,17%   | 13,37%  | 10,93%  | 5,71%   |
| # -3,15mm + 1 mm   | 0,06%   | 0,79%   | 1,05%   | 3,68%   | 0,93%   | 0,59%   |
| # -1 mm + 0,85 mm  | 0,11%   | 0,41%   | 0,31%   | 0,90%   | 0,68%   | 0,22%   |
|                    | 100,00% | 100,00% | 100,00% | 100,00% | 100,00% | 100,00% |

### Erro Percentual

|       | 1     | 2     | 3     | 4     | 5     | 6 |
|-------|-------|-------|-------|-------|-------|---|
| 0,10% | 0,32% | 0,19% | 0,39% | 0,54% | 0,11% |   |
| 0,61% | 0,90% | 0,59% | 1,30% | 0,83% | 0,59% |   |
| 3,57% | 0,83% | 1,35% | 0,96% | 1,71% | 1,44% |   |
| 5,32% | 3,45% | 3,58% | 3,12% | 5,26% | 2,66% |   |
| 2,36% | 0,88% | 2,52% | 2,13% | 2,58% | 2,21% |   |

### Método Strata

|                    | 1      | 2      | 3      | 4      | 5      | 6      |
|--------------------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| # -25,4mm + 12,7mm | 81,80% | 77,95% | 74,48% | 59,90% | 69,03% | 67,02% |
| # -12,7mm + 6,35mm | 15,02% | 17,23% | 19,28% | 25,81% | 23,64% | 24,34% |
| # -6,35mm + 3,15mm | 2,27%  | 4,34%  | 5,29%  | 11,22% | 2,61%  | 7,61%  |

|                    |          |          |          |          |          |          |
|--------------------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|
| # -3,15mm + 1 mm   | 0,68%    | 0,31%    | 0,75%    | 2,65%    | 3,65%    | 0,79%    |
| # -1 mm + 0,85 mm  | 0,23%    | 0,17%    | 0,19%    | 0,42%    | 1,08%    | 0,24%    |
|                    | 100,00%  | 100,00%  | 100,00%  | 100,00%  | 100,00%  | 100,00%  |
| <b>Corte B</b>     | <b>1</b> | <b>2</b> | <b>3</b> | <b>4</b> | <b>5</b> | <b>6</b> |
| # -25,4mm + 12,7mm | 81,58%   | 76,35%   | 73,73%   | 59,95%   | 67,66%   | 77,81%   |
| # -12,7mm + 6,35mm | 15,69%   | 18,01%   | 18,81%   | 24,03%   | 25,21%   | 18,06%   |
| # -6,35mm + 3,15mm | 2,35%    | 5,06%    | 6,66%    | 12,18%   | 2,70%    | 3,57%    |
| # -3,15mm + 1 mm   | 0,25%    | 0,38%    | 0,65%    | 3,09%    | 3,62%    | 0,44%    |
| # -1 mm + 0,85 mm  | 0,13%    | 0,20%    | 0,14%    | 0,75%    | 0,80%    | 0,12%    |
|                    | 100,00%  | 100,00%  | 100,00%  | 100,00%  | 100,00%  | 100,00%  |
| <b>Corte C</b>     | <b>1</b> | <b>2</b> | <b>3</b> | <b>4</b> | <b>5</b> | <b>6</b> |
| # -25,4mm + 12,7mm | 83,10%   | 75,54%   | 74,98%   | 57,65%   | 63,73%   | 75,36%   |
| # -12,7mm + 6,35mm | 14,19%   | 20,06%   | 17,57%   | 26,15%   | 19,54%   | 18,84%   |
| # -6,35mm + 3,15mm | 2,06%    | 4,04%    | 6,65%    | 12,95%   | 11,96%   | 5,00%    |
| # -3,15mm + 1 mm   | 0,54%    | 0,21%    | 0,60%    | 2,69%    | 3,79%    | 0,65%    |
| # -1 mm + 0,85 mm  | 0,11%    | 0,16%    | 0,20%    | 0,56%    | 0,99%    | 0,15%    |
|                    | 100,00%  | 100,00%  | 100,00%  | 100,00%  | 100,00%  | 100,00%  |

#### Erro Percentual

| 1     | 2     | 3     | 4     | 5     | 6     |
|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| 0,10% | 0,16% | 0,08% | 0,22% | 0,41% | 0,77% |
| 0,50% | 0,79% | 0,48% | 0,45% | 1,28% | 1,67% |
| 0,68% | 1,17% | 1,27% | 0,71% | 9,33% | 3,80% |
| 4,49% | 2,93% | 1,16% | 0,87% | 0,24% | 2,84% |
| 3,94% | 1,14% | 1,91% | 2,89% | 1,48% | 3,58% |

#### Windrow

|                    |          |          |          |          |          |          |
|--------------------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|
| <b>Corte A</b>     | <b>1</b> | <b>2</b> | <b>3</b> | <b>4</b> | <b>5</b> | <b>6</b> |
| # -25,4mm + 12,7mm | 77,82%   | 78,42%   | 73,74%   | 63,63%   | 76,22%   | 79,33%   |
| # -12,7mm + 6,35mm | 17,29%   | 17,85%   | 19,74%   | 22,07%   | 16,94%   | 15,36%   |
| # -6,35mm + 3,15mm | 4,68%    | 3,15%    | 5,63%    | 11,10%   | 5,72%    | 4,77%    |
| # -3,15mm + 1 mm   | 0,12%    | 0,44%    | 0,68%    | 2,88%    | 0,78%    | 0,37%    |
| # -1 mm + 0,85 mm  | 0,09%    | 0,15%    | 0,20%    | 0,32%    | 0,34%    | 0,17%    |
|                    | 100,00%  | 100,00%  | 100,00%  | 100,00%  | 100,00%  | 100,00%  |
| <b>Corte B</b>     | <b>1</b> | <b>2</b> | <b>3</b> | <b>4</b> | <b>5</b> | <b>6</b> |
| # -25,4mm + 12,7mm | 78,36%   | 76,49%   | 78,67%   | 66,73%   | 75,97%   | 66,12%   |
| # -12,7mm + 6,35mm | 17,93%   | 18,64%   | 16,47%   | 20,38%   | 17,11%   | 27,04%   |
| # -6,35mm + 3,15mm | 3,48%    | 4,01%    | 4,59%    | 10,44%   | 6,08%    | 6,28%    |
| # -3,15mm + 1 mm   | 0,12%    | 0,55%    | 0,18%    | 2,10%    | 0,66%    | 0,44%    |
| # -1 mm + 0,85 mm  | 0,10%    | 0,31%    | 0,09%    | 0,36%    | 0,18%    | 0,12%    |
|                    | 100,00%  | 100,00%  | 100,00%  | 100,00%  | 100,00%  | 100,00%  |
| <b>Corte C</b>     | <b>1</b> | <b>2</b> | <b>3</b> | <b>4</b> | <b>5</b> | <b>6</b> |
| # -25,4mm + 12,7mm | 77,47%   | 77,84%   | 74,81%   | 66,23%   | 76,01%   | 70,15%   |
| # -12,7mm + 6,35mm | 18,36%   | 16,79%   | 18,03%   | 22,41%   | 19,05%   | 21,30%   |
| # -6,35mm + 3,15mm | 3,99%    | 4,66%    | 5,74%    | 8,71%    | 4,30%    | 7,49%    |



|                   |         |         |         |         |         |         |
|-------------------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|
| # -3,15mm + 1 mm  | 0,09%   | 0,56%   | 1,11%   | 2,29%   | 0,47%   | 0,89%   |
| # -1 mm + 0,85 mm | 0,09%   | 0,14%   | 0,32%   | 0,36%   | 0,17%   | 0,16%   |
|                   | 100,00% | 100,00% | 100,00% | 100,00% | 100,00% | 100,00% |

| Erro Percentual |       |       |       |       |       |   |
|-----------------|-------|-------|-------|-------|-------|---|
|                 | 1     | 2     | 3     | 4     | 5     | 6 |
| <b>0,06%</b>    | 0,13% | 0,34% | 0,25% | 0,02% | 0,94% |   |
| <b>0,30%</b>    | 0,52% | 0,91% | 0,50% | 0,66% | 2,75% |   |
| <b>1,48%</b>    | 1,93% | 1,19% | 1,22% | 1,76% | 2,21% |   |
| <b>1,63%</b>    | 1,34% | 7,03% | 1,68% | 2,48% | 5,00% |   |
| <b>0,65%</b>    | 4,81% | 5,60% | 0,69% | 4,27% | 2,06% |   |

Assim sendo, na maioria das faixas granulométricas para cada seção, os erros foram inferiores a 2% em relação a porcentagem de material. Os finos por terem menor quantidade de material, seriam os mais preocupantes, mas houve poucas oscilações e as medidas parecem confiáveis para prosseguir, usando a porcentagem média de cada corte para obter o fator de segregação.



## Lista de Figuras

- Figura 01 - Os três métodos de empilhamento que serão tratados neste trabalho: Chevron, Strata e Windrow. Extraída de Chaves, A.P.[1]
- Figura 02 - Stacker e Reclaimer. Fonte: <http://www.krupprobins.com/Products/Stackers/slewingandluffingstackers.html>
- Figura 03 - Problemas comuns aos empilhamentos em boas práticas: Empoçamento e Baixa resistência da pilha. Fonte: <http://maritimeaccident.org/tags/nickel-ore>
- Figura 04 - Esquema de empilhamento Chevron. Fonte: <http://www.abb.com/industries/db0003db002806/e29095140f8c008fc12573b1002d9a69.aspx?tabKey=6>
- Figura 05 - Esquema ilustrativo do método Strata. Fonte: [http://www.thyssenkruppmaterialshandling.co.za/Images/332\\_StackingReclaiming\\_MechanicalTechnology\\_NovemberIssue\\_13122010.pdf](http://www.thyssenkruppmaterialshandling.co.za/Images/332_StackingReclaiming_MechanicalTechnology_NovemberIssue_13122010.pdf)
- Figura 06 - Esquema ilustrativo do método Windrow. Fonte: <http://www.abb.com/industries/db0003db002806/e29095140f8c008fc12573b1002d9a69.aspx?tabKey=6>
- Figura 07 - Esquema ilustrativo dos Métodos de retomada. Fonte: [http://www.isomonte.com.br/site2008/upload/arq\\_20090731085555.pdf](http://www.isomonte.com.br/site2008/upload/arq_20090731085555.pdf)
- Figura 08 - Gráfico Custo de empilhamento x Largura das pilhas. Extraído de Ferreira F. m [2];
- Figura 09 - Empilhadeira com lança fixa e única instalada em Mina de Vargem Grande.Fonte: [http://www.isomonte.com.br/site2008/upload/arq\\_2011080122333782922.pdf](http://www.isomonte.com.br/site2008/upload/arq_2011080122333782922.pdf)
- Figura 10 - Empilhadeira basculável instalada na Mina de Apatita da Bungue. Fonte: [http://www.isomonte.com.br/site2008/upload/arq\\_20110801145535.pdf](http://www.isomonte.com.br/site2008/upload/arq_20110801145535.pdf)
- Figura 11 - Maior Stacker de minério de ferro localizado no Porto de Itaqui, MA. Fonte: <http://portaldacomunicacao.uol.com.br/graficas-livros/60/artigo274577-1>
- Figura 12 - Empilhadeiras com duas lanças móveis - Isomonte S/A. Fonte: [http://www.asplant.biz/tripper\\_belt\\_conveyor.htm](http://www.asplant.biz/tripper_belt_conveyor.htm)
- Figura 13 - Transportador de Correia acoplado a Tripper. Fonte: <http://www.usinenouvelle.com/industry/hand-truck-o527.html>
- Figura 14 - Ilustração do comportamento granulométrico obtido em roda de caçambas. Extraído de Chaves, A. P. [1];
- Figura 15 - Retomador de Ponte com roda de caçambas. Fonte: <http://www.miningandconstruction.sandvik.com/sandvik/0120/Internet/Global/S003715.nsf/GenerateTopFrameset?ReadForm&menu=&view=http%3A//>
- Figura 16 - Retomador de lança com roda de caçamba. Fonte: <http://www.thyssenkrupprobins.com/Products/Reclaimers/bwreclaimers.html>
- Figura 17 - Modelo de Stacker Reclaimer. Fonte: [http://www.miningandconstruction.sandvik.com/Sandvik/0120/Internet/Global/S003713.nsf/Alldocs/Brochures\\*2AStackers\\*2FReclaimers\\*\\*2D\\*PD\\*series/\\$file/Stackers-Reclaimers\\_PD\\_web.pdf](http://www.miningandconstruction.sandvik.com/Sandvik/0120/Internet/Global/S003713.nsf/Alldocs/Brochures*2AStackers*2FReclaimers**2D*PD*series/$file/Stackers-Reclaimers_PD_web.pdf)
- Figura 18- Demonstração da segregação em transportador de correia. Extraído de Brock, J.D., May, J. G, Renegar, G [6];
- Figura 19 - Demonstração da segregação granulométrica na pilha. Extraído de Brock, J.D., May, J. G, Renegar, G [6];

- Figura 20 - Exemplo prático de segregação em ração para aves. Fonte: <http://pt.engormix.com/MA-avicultura/nutricao/artigos/metodo-determinacao-granulometria-ingredientes-t970/141-p0.htm>
- Figura 21 - Ilustração do ângulo de repouso de um material. Fonte: [http://en.wikipedia.org/wiki/Angle\\_of\\_repose](http://en.wikipedia.org/wiki/Angle_of_repose).
- Figura 22 - Britagem do material doado. Fotografia retirada pelo autor.
- Figura 23 - Fotografias do escalpe de finos e de grossos. Fotografia retirada pelo autor.
- Figura 24 - Estudo do ângulo de repouso. Fotografia retirada pelo autor.
- Figura 25 - Dispositivo de corte e amostragem de material para estudo da pilha. Fotografia retirada pelo autor.
- Figura 26 - Homogeneização e pilhas Chevron, Strata e Windrow. Fotografia retirada pelo autor.
- Figura 27 - Corte da pilha com o dispositivo. Fotografia retirada pelo autor.
- Figura 28 - Amostragem e Pesagem do material. Fotografia retirada pelo autor.
- Figura 31 - Pilha do método cone Shell. Fonte: <http://www.stockpile.ws/english/Products/Stockyard%2520systems/index.video.2.0.html>
- Figura 32- Método de empilhamento Six Row. Fonte: [http://www.thyssenkrupp-materialshandling.co.za/Images/332\\_StackingReclaiming\\_MechanicalTechnology\\_NovemberIssue\\_13122010.pdf](http://www.thyssenkrupp-materialshandling.co.za/Images/332_StackingReclaiming_MechanicalTechnology_NovemberIssue_13122010.pdf)
- Figura 33 - Método de Empilhamento multichevron. Extraído de Chaves [1].
- Figura 34 - Retomador de Ponte com raspador usado em cimenteiras. Fonte: <http://www.ameco-tm.com/cement-industry/>
- Figura 35- Retomador de tambores da Tyssen Krupp. Fonte: <http://www.thyssenkruppbrins.com/Products/Reclaimers/bridgetypedrumreclaimers.html>
- Figura 36 - Retomador de disco. Fonte: <http://www.ecorporates.com/castings.html>
- Figura 37 - Controle de operação da VALE para conter poeiras. Fonte: <http://www.capixabao.com/noticia/14764/economia/vale-reduz-emissao-de-poeira-em-suas-operacoes/>
- Figura 38 - Contaminação de solo e águas pluviais por metais pesados. Fonte: <http://www.adesg.net.br/noticias/bndes-apoia-tecnologia-para-recuperar-solos-e-agua-contaminados-por-metais-pesados>
- Figura 39 - Retomada por baixo da pilha e acúmulo de material nas bordas. Fonte: <http://www.skyscrapercity.com/archive/index.php/t-1133027.html>
- Figura 40 – Presença de semi-cones nas pilhas. Fonte: <http://www.skyscrapercity.com/archive/index.php/t-1133027.html>