

**MATEUS PAULA SANTOS PIRES**

**Projeto mecânico e fabricação de protótipo de uma peneira rotativa inclinada**

**Mateus Paula Santos Pires**

**Projeto mecânico e fabricação de protótipo de uma peneira rotativa inclinada**

Trabalho de Graduação apresentado ao Conselho de Curso de Graduação em Engenharia Mecânica da Faculdade de Engenharia do Campus de Guaratinguetá, Universidade Estadual Paulista, como parte dos requisitos para obtenção do diploma de Graduação em Engenharia Mecânica.

Orientador: Prof. Dr. Fernando de Azevedo Silva

Guaratinguetá - SP  
2022

P667p Pires, Mateus Paula Santos  
Projeto mecânico e fabricação de protótipo de uma peneira rotativa inclinada /  
Mateus Paula Santos Pires – Guaratinguetá, 2022.  
41 f. : il.  
Bibliografia: f. 40-41

Trabalho de Graduação em Engenharia Mecânica – Universidade Estadual  
Paulista, Faculdade de Engenharia de Guaratinguetá, 2022.  
Orientador: Prof. Dr. Fernando de Azevedo Silva

1. Separadores (Máquinas). 2. AutoCAD Civil 3D (Recurso eletrônico).  
3. Deformações de tensões. 4. Teste de materiais. I. Título.

CDU 624.042.6

Luciana Máximo  
Bibliotecária CRB-  
8/3595

**MATEUS PAULA SANTOS PIRES**

ESTE TRABALHO DE GRADUAÇÃO FOI JULGADO ADEQUADO COMO  
PARTE DO REQUISITO PARA A OBTENÇÃO DO DIPLOMA DE  
“GRADUADO EM ENGENHARIA MECÂNICA”

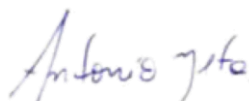
APROVADO EM SUA FORMA FINAL PELO CONSELHO DE CURSO DE  
GRADUAÇÃO EM NOME DO CURSO

Prof. Dr. CELSO EDUARDO TUNA  
Coordenador

**BANCA EXAMINADORA:**



Prof. Dr. Fernando de Azevedo Silva  
Orientador/UNESP-FEG



Prof. Me. Antônio dos Reis de Faria Neto  
UNESP-FEG



Prof. Me. Geraldo Cesar Rosario De Oliveira  
UNESP-FEG

## **DADOS CURRICULARES**

### **MATEUS PAULA SANTOS PIRES**

**NASCIMENTO** 19.12.1997 – São José dos Campos / SP

**FILIAÇÃO** Márcio de Souza Pires  
Luciana Marques Paula Santos Pires

**2016/2022** Graduação em Engenharia Mecânica – Bacharelado  
Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”

## AGRADECIMENTOS

aos meus pais *Márcio de Souza Pires e Luciana Marques Paula Santos Pires*, que sempre me apoiaram, incentivaram e me educaram para eu ser quem sou hoje.

ao meu irmão, *João Paula Santos Pires*, que sempre esteve presente para me auxiliar, inclusive com este trabalho, com sua boa vontade, didática e inteligência.

aos meus amigos, que mesmo nos momentos difíceis estiveram comigo e que tornam a vida mais fácil de ser vivida.

ao meu orientador, *Prof. Dr. Fernando de Azevedo Silva*, pelo apoio dado e por cada aula lecionada durante a graduação.

à todos os professores que sentem prazer em repassar o conhecimento e que além disso são responsáveis por nossa formação para vida.

à empresa Metallince, onde estagio, que forneceu todo material, maquinário e mão de obra necessária para produção do protótipo exposto neste trabalho.

“Só sabemos com exatidão quando sabemos pouco; à medida que vamos adquirindo conhecimento, instala-se a dúvida.”

Goethe

## RESUMO

O uso de aparatos de peneiramento pode ser visto como um facilitador do processo de determinados materiais por parte da indústria, tais como a areia, largamente empregada na construção civil. Do ponto de vista funcional, peneiras mecânicas rotativas também permitem reduzir o tamanho dos grãos de brita visando a seu uso em aplicações específicas, dentre as quais se destaca a demanda por asfalto e pavimentação. O presente trabalho tem por objetivo realizar o projeto mecânico de uma peneira rotativa inclinada, industrialmente utilizada para a obtenção de brita 1 (tamanho de grão compreendido entre 9,5 mm e 19 mm), material de interesse na área de construção civil. Após o estabelecimento do projeto mecânico, apresenta-se a modelagem 3D do equipamento e o desenho computacional no software Autodesk AutoCAD. Por fim, realiza-se a fabricação de um protótipo da peneira via corte de chapas metálicas a plasma e soldagem.

**PALAVRAS-CHAVE:** Peneira Rotativa. Projeto Mecânico. Protótipo.

## **ABSTRACT**

The use of sieving apparatus can be seen as a facilitator of the process of certain materials by the industry, such as sand, widely used in civil construction. From a functional point of view, trommel screens also allow the reduction of the size of the crushed stones, aiming at their use in specific applications, among which the demand for asphalt and paving stands out. The present work aims to carry out the mechanical design of an inclined trommel screen, industrially used to obtain crushed stone 1 (grain size between 9.5 mm and 19 mm), material of interest in the area of civil construction. After the establishment of the mechanical project, the 3D modeling of the equipment and the computational design is carried out in Autodesk AutoCAD software. Finally, a prototype of the sieve is fabricated via plasma sheet metal cutting and welding.

**KEYWORDS:** Trommel Screen. Mechanic Project. Prototype.

## LISTA DE ILUSTRAÇÕES

|  |    |
|--|----|
| Figura 1 – Princípio básico de operação da peneira .....                           | 15 |
| Figura 2 – Representação esquemática de uma grelha fixa .....                      | 16 |
| Figura 3 – Representação esquemática de uma peneira DSM .....                      | 17 |
| Figura 4 – Representação esquemática de uma grelha vibratória .....                | 18 |
| Figura 5 – Representação esquemática de dois tipos de trommel .....                | 18 |
| Figura 6 – Representação esquemática de uma peneira recíproca Ferrari .....        | 19 |
| Figura 7 – Representação esquemática de uma peneira vibratória.....                | 20 |
| Fotografia 1 – Tubos serrados nas dimensões definidas para montagem .....          | 28 |
| Fotografia 2 – Estrutura base da peneira.....                                      | 28 |
| Figura 8 – Captura de tela do plano de corte realizado no software SigmaNEST ..... | 29 |
| Fotografia 3 – Chapas de aço cortadas na máquina de corte a plasma CNC .....       | 29 |
| Fotografia 4 – Cilindro de peneiramento e eixo .....                               | 30 |
| Figura 9 – Diagrama de Corpo Livre do eixo da peneira .....                        | 31 |
| Figura 10 – Diagrama de Corpo Livre simplificado do eixo da peneira .....          | 31 |
| Figura 11 – Diagramas de esforços do eixo da peneira .....                         | 33 |
| Figura 12 – Desenho 2D de montagem da estrutura base da peneira .....              | 35 |
| Figura 13 – Desenho 2D de montagem do cilindro de peneiramento e eixo .....        | 35 |
| Figura 14 – Vista isométrica 1 da peneira em 3D.....                               | 36 |
| Figura 15 – Vista isométrica 2 da peneira em 3D.....                               | 36 |
| Figura 16 – Vista lateral da peneira em 3D .....                                   | 36 |
| Fotografia 5 – Vista lateral do protótipo .....                                    | 37 |
| Fotografia 6 – Vista frontal superior do protótipo.....                            | 38 |

## LISTA DE TABELAS

|  |    |
|--|----|
| Tabela 1 – Fatores de correção para o tamanho .....        | 23 |
| Tabela 2 – Coeficientes para o fator de superfície .....   | 23 |
| Tabela 3 – Fatores de correção para a confiabilidade ..... | 24 |

## **LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS**

|     |                                   |
|-----|-----------------------------------|
| DSM | Dutch State Mine                  |
| DEC | Diagrama de Esforço Cortante      |
| DMF | Diagrama de Momento Fletor        |
| CNC | Controle Numérico Computadorizado |
| DCL | Diagrama de Corpo Livre           |

## SUMÁRIO

|                  |   |           |
|------------------|---|-----------|
| <b>1</b>         | <b>INTRODUÇÃO .....</b>                         | <b>13</b> |
| 1.1              | OBJETIVOS.....                                  | 13        |
| <b>1.1.1</b>     | <b>Objetivos específicos .....</b>              | <b>14</b> |
| <b>2</b>         | <b>DESENVOLVIMENTO .....</b>                    | <b>15</b> |
| 2.1              | REVISÃO DA LITERATURA .....                     | 15        |
| <b>2.1.1</b>     | <b>Peneiramento .....</b>                       | <b>15</b> |
| <b>2.1.2</b>     | <b>Tipos de equipamentos .....</b>              | <b>16</b> |
| 2.1.2.1          | Grelhas fixas.....                              | 16        |
| 2.1.2.2          | Peneiras fixas.....                             | 17        |
| 2.1.2.3          | Grelhas vibratórias.....                        | 17        |
| 2.1.2.4          | Peneiras rotativas .....                        | 18        |
| 2.1.2.5          | Peneiras reciprocativas.....                    | 19        |
| 2.1.2.6          | Peneiras vibratórias.....                       | 19        |
| <b>2.1.3</b>     | <b>Eficiência de peneiramento .....</b>         | <b>20</b> |
| <b>2.1.4</b>     | <b>Fadiga em peneiras rotativas.....</b>        | <b>21</b> |
| 2.1.4.1          | Fatores modificadores do limite de fadiga ..... | 23        |
| <i>2.1.4.1.1</i> | <i>Efeitos do carregamento .....</i>            | <i>22</i> |
| <i>2.1.4.1.2</i> | <i>Efeitos do tamanho .....</i>                 | <i>22</i> |
| <i>2.1.4.1.3</i> | <i>Efeitos da superfície.....</i>               | <i>23</i> |
| <i>2.1.4.1.4</i> | <i>Efeitos da temperatura.....</i>              | <i>24</i> |
| <i>2.1.4.1.5</i> | <i>Efeitos da confiabilidade.....</i>           | <i>24</i> |
| 2.2              | MATERIAIS E METODOLOGIA .....                   | 25        |
| <b>2.2.1</b>     | <b>Especificações de projeto.....</b>           | <b>25</b> |
| <b>2.2.2</b>     | <b>Dimensionamento do eixo.....</b>             | <b>25</b> |
| <b>2.2.3</b>     | <b>Inclinação ideal da peneira.....</b>         | <b>27</b> |
| <b>2.2.4</b>     | <b>Fabricação do protótipo .....</b>            | <b>27</b> |
| 2.3              | <b>RESULTADOS E DISCUSSÃO.....</b>              | <b>30</b> |
| <b>2.3.1</b>     | <b>Dimensionamento do eixo.....</b>             | <b>30</b> |
| 2.3.1.1          | Fator de correção do carregamento.....          | 32        |
| 2.3.1.2          | Fator de correção do tamanho .....              | 32        |
| 2.3.1.3          | Fator de correção da superfície.....            | 33        |
| 2.3.1.4          | Fator de correção da temperatura .....          | 33        |

|              |  |           |
|--------------|--|-----------|
| 2.3.1.6      | Limite de resistência a fadiga não corrigido ..... | 34        |
| 2.3.1.7      | Limite de resistência a fadiga corrigido.....      | 34        |
| 2.3.1.8      | Diâmetro do eixo .....                             | 34        |
| <b>2.3.2</b> | <b>Desenhos de montagem e modelagem 3D.....</b>    | <b>34</b> |
| <b>2.3.3</b> | <b>Protótipo da peneira rotativa .....</b>         | <b>37</b> |
| <b>3</b>     | <b>CONCLUSÃO.....</b>                              | <b>39</b> |
|              | <b>REFERÊNCIAS.....</b>                            | <b>39</b> |
|              | <b>BIBLIOGRAFIA CONSULTADA.....</b>                | <b>40</b> |

## 1 INTRODUÇÃO

Com o avanço da globalização, a busca pela maximização do desempenho com a manutenção da qualidade tem sido cada vez mais o objetivo das empresas. Para que isso seja alcançado, é de suma importância se ter as melhores opções de processo, cuja estabilidade está diretamente relacionada a aplicação de um padrão, ou seja, para garantir a qualidade, a diminuição da variabilidade é um fator determinante.

O uso de aparatos de peneiramento pode ser considerado um grande exemplo de facilitador no processo de obtenção de diversos materiais por parte da indústria, na medida que permitem otimizar o tempo dispendido nas operações e garantem uma padronização dos grãos. As peneiras mecânicas industriais despontam como opções de custo viável e de bom aproveitamento.

O peneiramento industrial é uma das operações unitárias mais tradicionais e universalmente aplicadas nas plantas de tratamento de minérios. Tem como objetivo a separação das partículas em diferentes frações granulométricas, divididas a partir de tamanhos pré-determinados, conhecidos também como tamanho de “corte” (WILLS, 2006).

Possui um vasto campo de aplicação na indústria mineral (minério de ferro, manganês, alumínio, cobre, ouro, calcário, gnaiss, granito, areias, carvão, etc.). Os equipamentos utilizados possuem capacidades bastante variadas, tão pequenas quanto próximas de 10t/h, até capacidades superiores a 5.000t/h, como é o caso das grelhas primárias (WILLS, 2006).

O método de peneiramento abordado neste trabalho, detalhado a seguir, consiste no uso da peneira rotativa inclinada, também conhecida como trommel, que tem como principais vantagens a simplicidade de construção e de operação, seu baixo custo de aquisição e durabilidade. Possuem aplicação em classificação e lavagem de cascalhos e areias, em lavras de aluviões e em mineração de ouro, diamante e cassiterita.

### 1.1 OBJETIVOS

Este trabalho tem como objetivo realizar o projeto mecânico e a prototipagem de uma peneira rotativa inclinada.

### **1.1.1 Objetivos específicos**

- Realizar o dimensionamento da peneira rotativa inclinada a partir de especificações de projeto;
- Desenvolver o desenho computacional do objeto de estudo via Autodesk AutoCAD;
- Fabricar protótipo do equipamento com base no projeto mecânico desenvolvido.

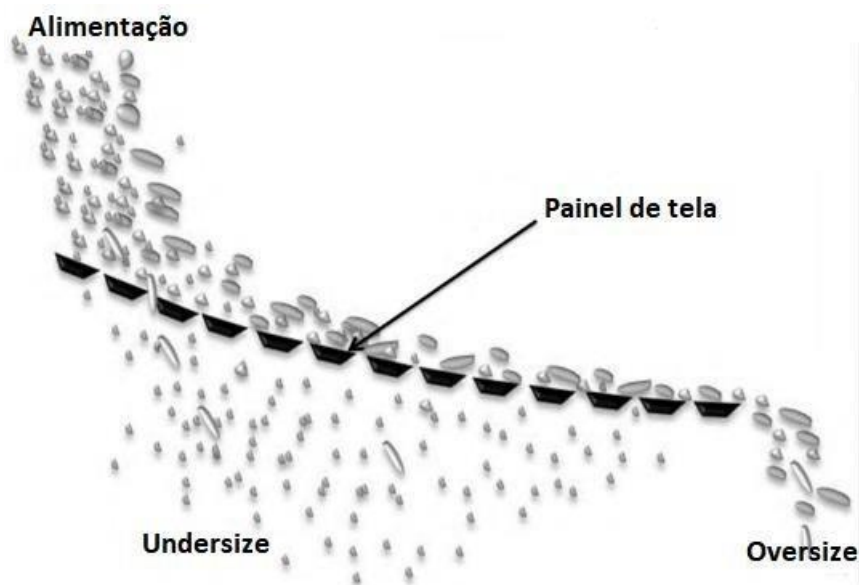
## 2 DESENVOLVIMENTO

### 2.1 REVISÃO DA LITERATURA

#### 2.1.1 Peneiramento

Segundo Luz (2004), o peneiramento pode ser definido como a separação de um material em duas ou mais classes granulométricas, sendo estas limitadas por uma inferior e outra superior. O material de granulometria mais grossa, que fica retido na tela da peneira, denomina-se *oversize*, e o passante, aquele com granulometria mais fina, que é liberado pela malha de telas e segue para as próximas etapas da planta de beneficiamento, é denominado *undersize*, como mostra a Figura 1:

Figura 1 – Princípio básico de operação da peneira.



Fonte: Gupta & Yan (2006).

Segundo Andery (1980), o peneiramento pode ser realizado tanto a seco quanto a úmido, sendo este último com o intuito de facilitar a passagem dos grãos finos através do painel de tela. Geralmente os peneiramentos industriais a seco são efetuados em frações granulométricas de até 6 mm, apesar de se ter uma eficiência razoável até 1,7 mm. Já o método a úmido é realizado comumente até 0,4 mm, podendo chegar até 50  $\mu\text{m}$ .

### 2.1.2 Tipos de Equipamentos

Pode-se dividir os dispositivos utilizados no peneiramento em três categorias:

**Grelhas** – formadas por barras arranjadas de forma paralela, com um espaço padrão entre si.

**Crivos** – constituídos por chapas metálicas, sendo elas planas ou curvas, que são perfuradas de diversas formas e tamanhos determinados.

**Telas** – arranjadas com fios metálicos, que normalmente se cruzam em direções ortogonais, de tal maneira que deixam entre si espaços quadrados ou retangulares com dimensões determinadas.

Tais equipamentos dividem-se ainda, quanto ao seu movimento, em duas categorias:

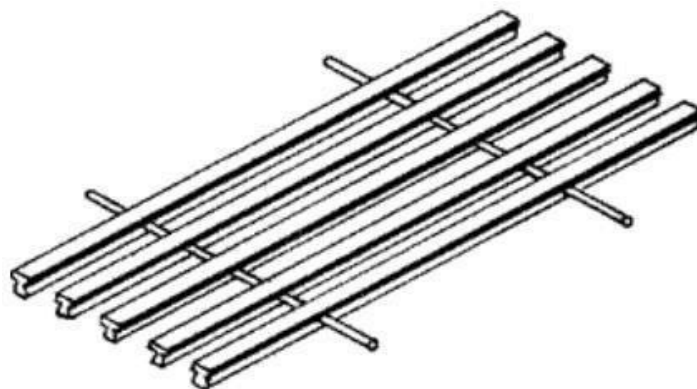
**Fixas** – A força da gravidade age unicamente e, portanto, esses dispositivos necessitam de uma superfície inclinada, como por exemplo as grelhas fixas e peneiras Dutch State Mines (DSM).

**Móveis** – grelhas vibratórias, peneiras rotativas, peneiras reciprocativas e peneiras vibratórias.

#### 2.1.2.1 Grelhas Fixas

Formadas por barras metálicas paralelas, dispostas por um espaçamento determinado, com uma inclinação de geralmente 35° a 45° (Figura 2). Utilizadas em circuitos de britagem para separar blocos de 7,5 a 0,2 cm, são majoritariamente empregadas a seco. Geralmente sua eficiência é reduzida (60%), já que não há movimentação da superfície, e por consequência não ocorre a estratificação, que promoveria uma melhor separação.

Figura 2 – Representação esquemática de uma grelha fixa.

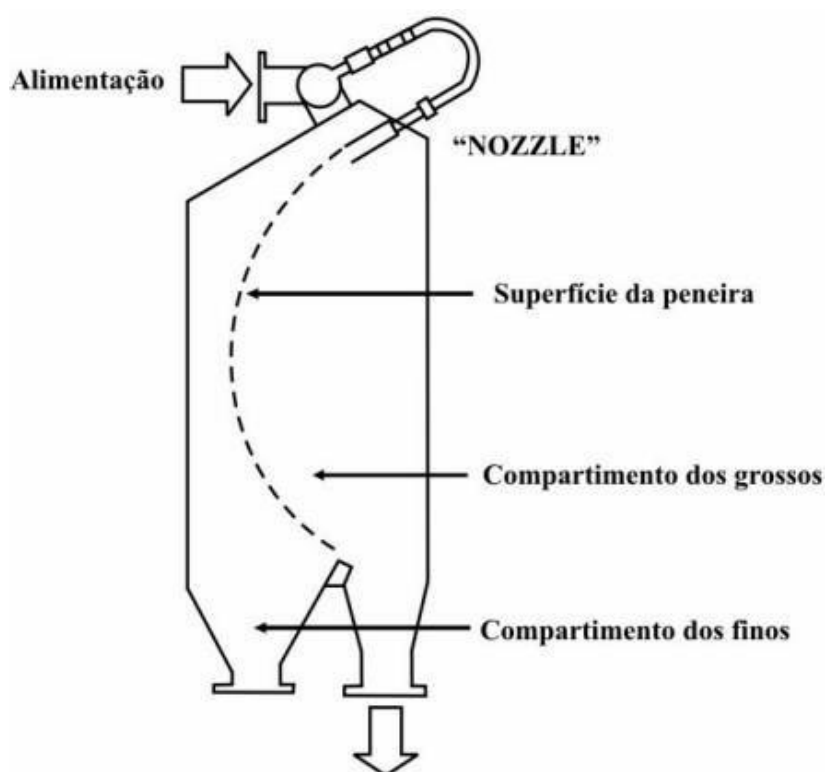


Fonte: Adão, João e Silvia (2010).

### 2.1.2.2 Peneiras Fixas

As peneiras DSM são usadas para desagumamento de suspensões e para separar de maneira mais precisa suspensões de partículas finas. Elas possuem uma base curva composta por fios espaçados paralelamente, ortogonais à alimentação, que é bombeada na porção superior e distribuída ao percorrer toda a extensão da peneira (Figura 3). Grãos com tamanho de aproximadamente metade do vão entre os fios passam pela superfície da peneira.

Figura 3 – Representação esquemática de uma peneira DSM.

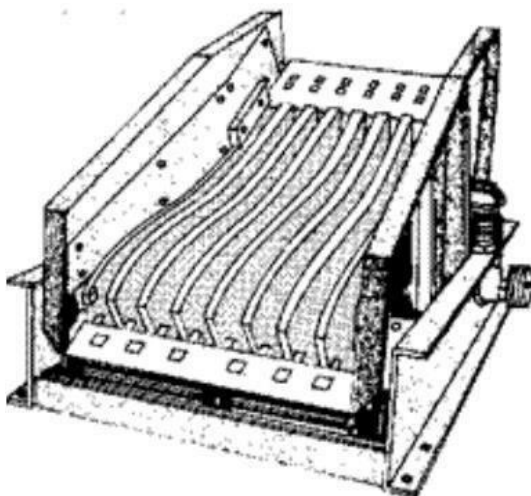


Fonte: Adão, João e Silvia (2010).

### 2.1.2.3 Grelhas vibratórias

Assemelham-se às grelhas fixas, mas sua superfície está sujeita a vibrações para facilitar a estratificação e se ter uma separação de grãos mais eficiente (Figura 4).

Figura 4 – Representação esquemática de uma grelha vibratória.

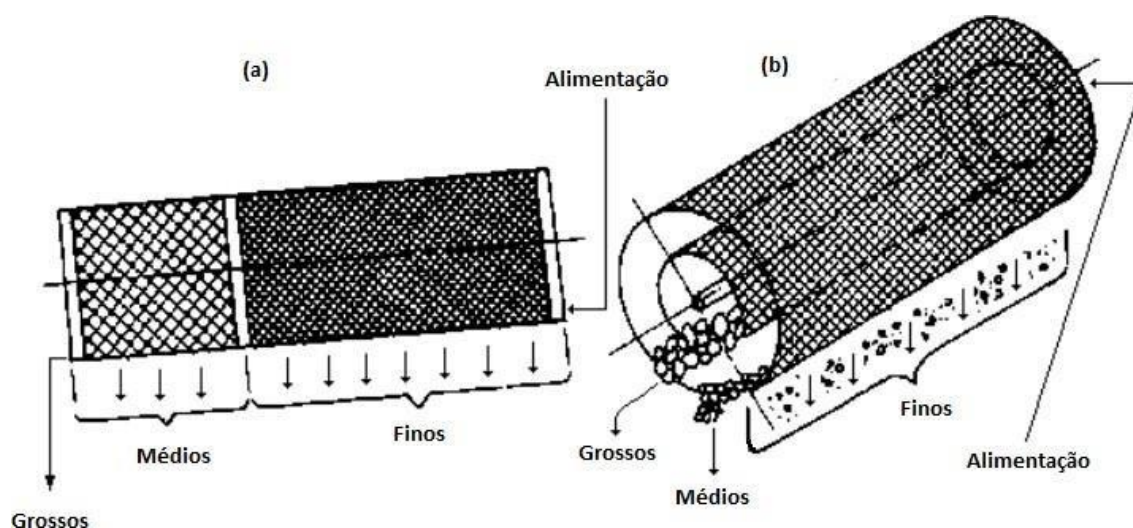


Fonte: Adão, João e Silvia (2010).

#### 2.1.2.4 Peneiras rotativas (Trommel)

São formadas por superfícies cilíndricas de peneiramento que rotacionam no eixo longitudinal, ligeiramente inclinado (entre  $4^\circ$  e  $10^\circ$ ), a depender da aplicação e do material a ser peneirado (Figura 5). A velocidade de rotação é cerca de 35 a 40% de sua velocidade crítica, que é a menor velocidade na qual os grãos ficam aderidos à parede cilíndrica. Os trommels têm como principais vantagens sua simplicidade de construção e de operação, seu custo reduzido e durabilidade.

Figura 5: Representação esquemática de dois tipos de trommel.

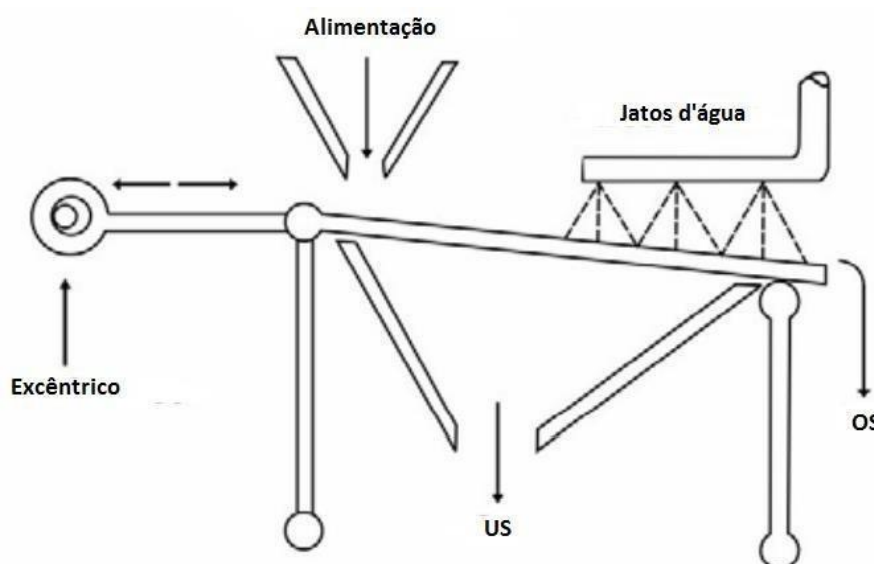


Fonte: Adão, João e Silvia (2010).

### 2.1.2.5 Peneiras reciprocativas

Tais peneiras (Figura 6) movimentam-se de forma alternada no plano da tela, fazendo com que os grãos se desloquem para frente. São montadas com uma ligeira inclinação, cerca de  $10^\circ$  a  $15^\circ$ , enquanto sua amplitude de movimento normalmente varia de 2 cm com uma frequência de 800 ciclos por minuto, até 25 cm com frequência de 60 ciclos por minuto. Geralmente são empregadas na classificação de materiais friáveis, como o carvão, pois diminuem a incidência do fenômeno de fragmentação das partículas.

Figura 6 – Representação esquemática de uma peneira reciprocativa Ferrari.

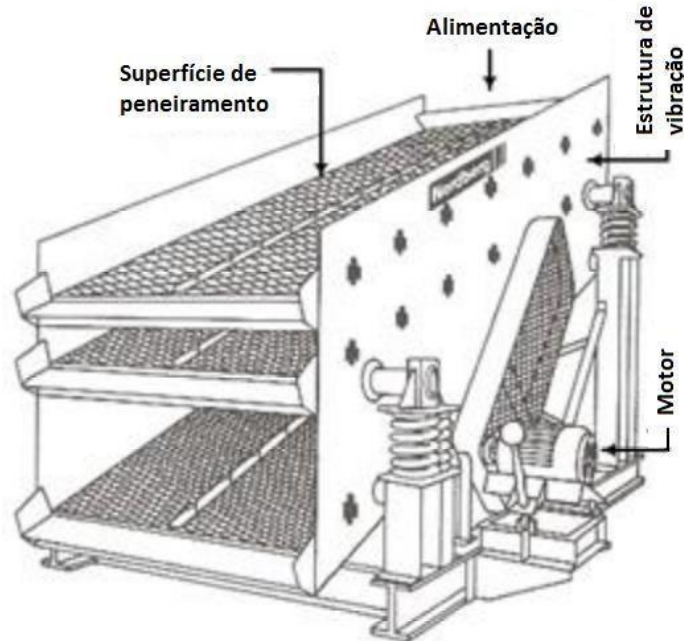


Fonte: Adão, João e Silvia (2010).

### 2.1.2.6 Peneiras vibratórias

Peneiras que recebem impulsos gerados por mecanismos mecânicos ou elétricos de alta frequência (600 a 3600 movimentos por minuto) e baixa amplitude de movimento (1,5 a 25 mm) (Figura 7). O movimento sempre ocorre no plano ortogonal à superfície de peneiramento, porém algumas peneiras o realizam de forma praticamente retilínea, enquanto outras realizam um movimento mais circular ou elíptico. Elas são bastante empregadas na mineração, com circuitos de britagem e preparo do minério para os processos de concentração.

Figura 7 – Representação esquemática de uma peneira vibratória.



Fonte: Adão, João e Silvia (2010).

### 2.1.3 Eficiência de Peneiramento

Segundo Wills (2006), a eficiência de peneiramento é determinada pelo “grau de perfeição” de separação do material em frações de tamanho acima ou abaixo das dimensões da abertura da peneira. A eficiência revela o grau de funcionamento do equipamento, em relação à separação granulométrica ideal desejada. Pode ser definida, portanto, como a relação entre o montante de grãos mais finos que o espaçamento da tela de peneiramento e que a atravessam e a quantidade deles na alimentação.

$$E = \frac{P}{aA} \times 100\% \quad [1]$$

Onde:

$E$  = eficiência;       $P$  = fluxo passante (t/h);       $A$  = alimentação (t/h);  
 $a$  = porcentagem de material menor que a malha de alimentação.

No meio industrial, o peneiramento possui uma eficiência de 80% a 95%. Os grãos com diâmetros ( $d$ ) maiores que uma vez e meia a abertura da tela ( $a$ ) não interferem no resultado do processo, assim como aqueles menores que a metade da abertura da tela. Já as partículas intermediárias a tais aberturas fazem parte da classe crítica de peneiramento, pois influenciam significativamente na eficiência e na capacidade das peneiras. Tal classe divide-se em outras duas:

$0,5a < d < a$  - que têm menor probabilidade de passar que as demais partículas menores que a malha;

$a < d < 1,5a$  - que apesar de não passarem pela malha, são as que mais entopem as telas das peneiras.

#### **2.1.4 Fadiga em peneiras rotativas**

Na maior parte dos ensaios para obtenção de propriedades mecânicas dos materiais a carga é aplicada gradualmente, para que a deformação possa desenvolver-se completamente. Além disso, as tensões são aplicadas somente uma vez, até a destruição do corpo de prova. Esse tipo de ensaio é realizado sob condições estáticas.

Contudo, frequentemente ocorre de as tensões variarem com o tempo ou flutuarem em diferentes níveis. Esse tipo de carregamento produz tensões que são chamadas de variáveis, repetidas, alternantes ou flutuantes.

Muitas vezes, componentes de máquinas falham devido a ação de tensões repetidas ou flutuantes, porém uma análise mais próxima revela que as tensões reais máximas eram significativamente inferiores a resistência última do material e em alguns casos menores até que a resistência ao escoamento do mesmo. A característica que explica tais casos é o número muito expressivo de repetições nos carregamentos. Por isso esse tipo de defeito é chamado de falha por fadiga.

Peneiras rotativas, quando em operação, são submetidas a este tipo de carregamento cíclico, o que torna o sistema vulnerável a falhas por fadiga. Devido à presença de tensões flutuantes no domínio do tempo, o dimensionamento do eixo da peneira, um dos focos deste trabalho, deve ser realizado levando-se em conta os esforços de fadiga atuantes.

#### 2.1.4.1 Fatores modificadores do Limite de Fadiga

A resistência a fadiga obtida por meio de ensaios com corpos de prova padrão ou de estimativas baseadas em testes estáticos precisa ser corrigida para que sejam levadas em consideração as diferenças físicas entre os corpos de prova e o item real a ser projetado. Condições do ambiente de ensaio, como temperatura e umidade, diferem das condições reais a que a peça irá ser submetida, assim como as diferentes formas de aplicação do carregamento (NORTON, 2013).

Para se obter o limite de resistência à fadiga corrigido, esses e outros fatores são levados em consideração.

$$S_e = C_{carreg} C_{tamanho} C_{superf} C_{temp} C_{conf} S_e' \quad [2]$$

Na Equação [2],  $S_e$  representa o limite de fadiga corrigido para um determinado material, e  $S_e'$  representa o limite de fadiga do corpo de prova (não corrigido). Os fatores modificadores do limite de fadiga são definidos a seguir.

##### 2.1.4.1.1 *Efeitos do carregamento*

A maior parte dos ensaios simula o corpo de prova sob flexão rotativa, portanto deve-se aplicar um fator de redução da resistência à fadiga quando a peça a ser projetada for submetida à força normal (NORTON, 2013).

|                    |                   |
|--------------------|-------------------|
| $C_{carreg} = 1$   | Para flexão       |
| $C_{carreg} = 1$   | Para torção       |
| $C_{carreg} = 0,7$ | Para força normal |

##### 2.1.4.1.2 *Efeitos do tamanho*

Os testes rotativos são realizados com corpos de prova de pequenas dimensões (por volta de 7,6 mm de diâmetro). Quando se testam corpos de prova de dimensões maiores, verifica-se uma redução do limite de fadiga, já que há maior probabilidade de se encontrar defeitos superficiais nos mesmos. Os seguintes fatores de redução devem ser aplicados:

Tabela 1 – Fatores de correção para o tamanho.

| $C_{tamanho}$ | $d$                             |
|---------------|---------------------------------|
| 1             | $d \leq 7,6 \text{ mm}$         |
| 0,85          | $7,6 \leq d \leq 50 \text{ mm}$ |
| 0,75          | $d \geq 50 \text{ mm}$          |

Fonte: Norton (2013).

### 2.1.4.1.3 Efeitos da superfície

Para evitar que defeitos superficiais atuem como intensificadores de tensão, os corpos de prova utilizados nos ensaios rotativos têm sua superfície polida, com um acabamento espelhado. Entretanto, geralmente essa não é a realidade, por conta do custo e praticidade. Acabamentos mais grosseiros reduzem a resistência a fadiga, pois introduzem conseqüentemente concentradores de tensão e podem alterar as propriedades físicas da superfície da peça. Torna-se necessário, portanto, a utilização do fator de redução  $C_{superf}$ , para considerar tais diferenças (NORTON, 2013).

$$C_{superf} = A \times (S_{sut})^b \quad [3]$$

Onde os coeficientes A e b são dados pela Tabela 2, em função do acabamento da superfície e  $S_{sut}$  é o limite de resistência à tração do material. Aplicam-se as constantes à Equação [3], caso se obtenha  $C_{superf} > 1$ , utiliza-se  $C_{superf} = 1$ .

Tabela 2 – Coeficientes para o fator de superfície.

| Acabamento superficial     | A    | b      |
|----------------------------|------|--------|
| Retificado                 | 1,58 | -0,085 |
| Usinado ou laminado a frio | 4,51 | -0,265 |
| Laminado a quente          | 57,7 | -0,718 |
| Forjado                    | 272  | -0,995 |

Fonte: Norton (2013).

#### 2.1.4.1.4 *Efeitos da temperatura*

Para que os efeitos da temperatura sejam levados em consideração, é necessário o uso do fator de redução da resistência  $C_{temp}$ . Os testes são realizados em aços, logo não devem ser utilizados em outros materiais (NORTON, 2013).

$$\text{Para } T \leq 450 \text{ }^{\circ}\text{C} \quad C_{temp} = 1$$

$$\text{Para } 450 \text{ }^{\circ}\text{C} \leq T \leq 550 \text{ }^{\circ}\text{C} \quad C_{temp} = 1 - 0,0058 (T - 450)$$

#### 2.1.4.1.5 *Efeitos da confiabilidade*

Geralmente, valores de resistência existentes na literatura referem-se a valores médios. Contudo, há uma significativa diferença nos testes feitos com o mesmo material e condições próximas de ensaio, e os desvios-padrão das resistências a fadiga raramente passam de 8% dos seus valores médios (NORTON, 2013). A Tabela 3 fornece os fatores de redução de resistência a fadiga conforme a confiabilidade requerida. Quanto maior a confiabilidade desejada, maior a correção da resistência.

Tabela 3 – Fatores de correção para a Confiabilidade.

| <b>Confiabilidade</b> | <b><math>C_{conf}</math></b> |
|-----------------------|------------------------------|
| 50                    | 1,000                        |
| 90                    | 0,897                        |
| 95                    | 0,868                        |
| 99                    | 0,814                        |
| 99,9                  | 0,753                        |
| 99,99                 | 0,702                        |
| 99,999                | 0,659                        |
| 99,9999               | 0,620                        |

Fonte: Norton (2013).

Uma vez obtido o valor de  $S_e$ , o diâmetro do eixo pode ser calculado com base na teoria da máxima tensão cisalhante de Soderberg, conforme Equação [4] (SHIGLEY, 2011). Utiliza-se tal critério de fadiga por ser uma teoria mais conservadora se comparada ao critério de Gerber ou até mesmo de Goodman modificado.

$$d = \sqrt[3]{\frac{32 \cdot n}{\pi} \cdot \sqrt{\left(\frac{M_t}{\sigma_e}\right)^2 + \left(\frac{M_f}{S_e}\right)^2}} \quad [4]$$

Onde:

$d$  = diâmetro do eixo;

$n$  = fator de segurança;

$M_t$  = momento torsor máximo

$\sigma_e$  = tensão de escoamento

$M_f$  = momento fletor máximo

$S_e$  = limite de fadiga corrigido.

## 2.2 MATERIAIS E METODOLOGIA

### 2.2.1 Especificações de projeto

Peneira rotativa inclinada:

- 2 m de comprimento;
- 1,5 m de altura;
- 90 cm de diâmetro;
- Obtenção de brita 1.

### 2.2.2 Dimensionamento do eixo

A massa total que o eixo da peneira deve ser capaz de suportar é sobretudo composta pelo material a ser peneirado (brita 1).

O volume do cilindro de peneiramento pode ser obtido considerando as especificações pré-definidas de projeto:

$$V_{cilindro} = \pi \cdot r^2 \cdot h \quad [5]$$

Onde:

$r$  = raio do cilindro;

$h$  = comprimento do cilindro.

Consultando o peso específico da brita 1 e estimando que a mesma ocupa até 20% do volume do cilindro, tem-se que:

$$m_{brita1} = \rho_{brita1} \cdot 0,20 \cdot V_{cilindro} \quad [6]$$

O peso pode ser então calculado, considerando a aceleração gravitacional  $g = 9,81 \text{ m/s}^2$ :

$$P_{brita1} = m_{brita1} \cdot g \quad [7]$$

Assim, pode-se representar esquematicamente o eixo da peneira sob ação do peso da brita 1, que de maneira simplificada pode ser considerado como uma carga uniformemente distribuída em toda sua extensão. Também como forma de simplificação, considera-se a peneira disposta horizontalmente, já que a inclinação de  $8^\circ$ , determinada anteriormente, não proporcionaria mudanças significativas nas componentes verticais das forças atuantes. Em seguida, assume-se que o conjunto encontra-se em equilíbrio e igualam-se as resultantes das forças atuantes à zero para determinar as reações de apoio em cada mancal de rolamento.

Com as reações de apoio determinadas, é possível elaborar os diagramas de esforço cortante (DEC) e de momento fletor (DMF) da estrutura. Por se tratar de uma carga uniformemente distribuída, o DEC é representado por uma reta conduzida pela seguinte equação do primeiro grau:

$$V = \frac{p \cdot l}{2} - p \cdot x \quad [8]$$

Onde:

$V$  = esforço cortante

$p$  = carga distribuída

$l$  = comprimento do eixo

$x$  = posição no eixo

- Para  $x = 0$  (apoio A)  $\rightarrow V = \frac{p \cdot l}{2}$
- Para  $x = l$  (apoio B)  $\rightarrow V = -\frac{p \cdot l}{2}$

Já o DMF é caracterizado por uma parábola do segundo grau e, portanto, é definida por três pontos:

$$M = \frac{p \cdot l}{2} \cdot x - \frac{p \cdot x^2}{2} \quad [9]$$

- Para  $x = 0$  (apoio A)  $\rightarrow M = 0$
- Para  $x = \frac{l}{2}$  (centro)  $\rightarrow M = \frac{p \cdot l}{2}$
- Para  $x = l$  (apoio B)  $\rightarrow M = 0$

A partir do momento fletor máximo, e das propriedades mecânicas do material, a resolução da Equação [4] fornece, finalmente, o valor mínimo do diâmetro do eixo.

### 2.2.3 Inclinação ideal da peneira

A inclinação da peneira rotativa possui grande efeito na eficiência e capacidade da mesma. Um dispositivo com maior inclinação contribui para que o material em seu interior avance mais rapidamente e a peneira tenha uma capacidade de peneiramento maior, contudo, por passar um fluxo maior de material, a eficiência de peneiramento acaba sendo reduzida. Por outro lado, uma inclinação menor, acarreta em um maior tempo de contato do material com a superfície de peneiramento e, portanto maior precisão e eficiência na triagem, apesar de se ter uma capacidade de peneiramento reduzida, devido ao menor fluxo de material.

Dessa forma, adotou-se para o projeto da peneira rotativa uma inclinação intermediária de cerca de 8°.

### 2.2.4 Fabricação do protótipo

Materiais:

- 6,4 m de tubo 20 x 20 mm de aço SAE 1020, 2 mm de espessura.
- 725 x 550 mm de chapa de aço SAE 1020, 2 mm de espessura.
- 500 x 595 mm de chapa de aço SAE 1020 perfurada, 2 mm de espessura.
- 585 mm de barra redonda de aço SAE 1020, 12,7 mm de diâmetro.

- 2 rolamentos

Optou-se por fazer um protótipo do projeto com escala reduzida (1:4) e com as devidas adaptações para um processo de fabricação simplificado.

Primeiramente, serrou-se o tubo de 20 x 20 mm em partes menores para compor a estrutura do protótipo como mostra a Fotografia 1:

Fotografia 1 – Tubos serrados nas dimensões definidas para montagem.



Fonte: Próprio autor.

Em seguida, os tubos foram ponteados e soldados para montagem do conjunto da estrutura base (Fotografia 2).

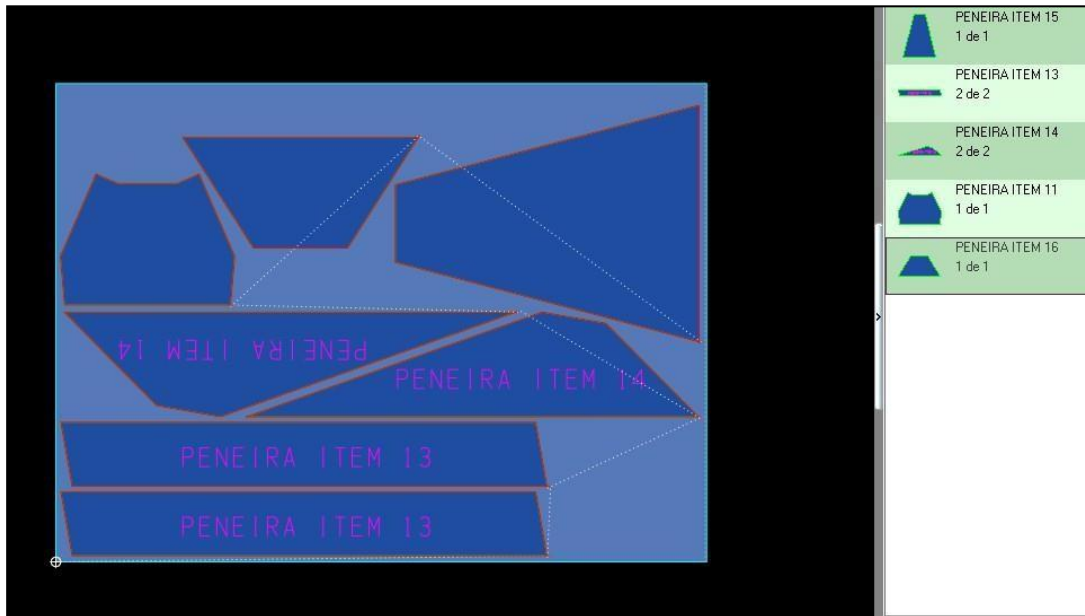
Fotografia 2 – Estrutura base da peneira.



Fonte: Próprio autor.

Com a chapa de aço de dimensões de 725 x 550 mm, realizou-se um plano de corte CNC no software SigmaNEST (Figura 8).

Figura 8 – Captura de tela do plano de corte realizado no programa SigmaNEST.



Fonte: Próprio autor.

As chapas são então cortadas por meio da máquina de corte a plasma CNC. Tais chapas compõem o funil central que recebe o material undersize, o funil frontal que recebe o material oversize e o fechamento das laterais (Figura 3).

Fotografia 3- Chapas de aço cortadas na máquina de corte a plasma CNC.



Fonte: Próprio autor.

Em seguida, cortou-se e calandrou-se a chapa de aço perfurada para confecção do cilindro de peneiramento (Fotografia 4).

Fotografia 4 – Cilindro de peneiramento e eixo



Fonte: Próprio autor.

## 2.3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

### 2.3.1 Dimensionamento do eixo.

O peso específico da brita 1 é de 1384 kg/m<sup>3</sup>. Combinando as Equações [5], [6] e [7], é possível calcular o peso que o eixo da peneira deve ser capaz de suportar:

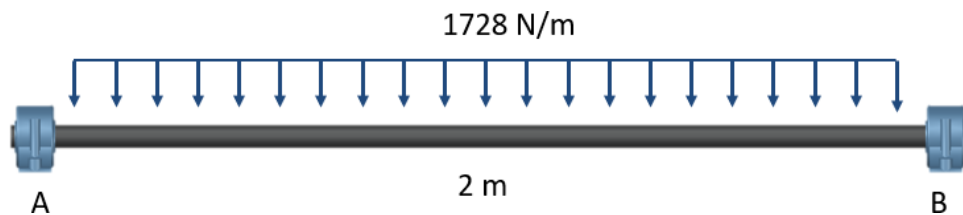
$$P_{brita1} = 0,20 \cdot \pi \cdot r^2 \cdot h \cdot \rho_{brita1} \cdot g \quad [10]$$

$$P_{brita1} = 0,20 \cdot \pi \cdot 0,45^2 \cdot 2 \cdot 1384 \cdot 9,81$$

$$P_{brita1} = 3455 \text{ N}$$

Considerando o peso da brita 1 sendo uma carga distribuída uniformemente em toda extensão do eixo, o Diagrama de Corpo Livre (DCL) pode ser assim representado:

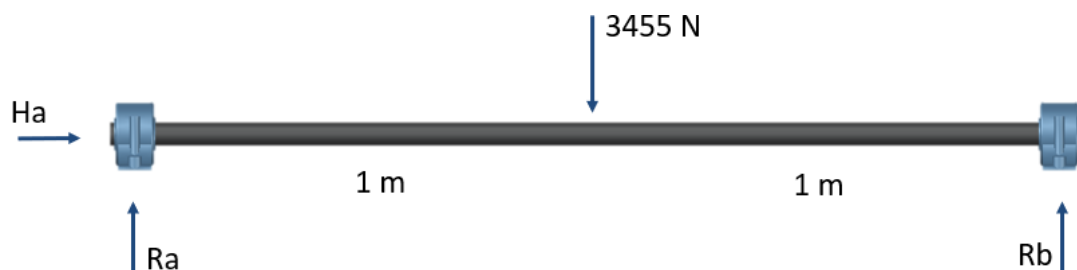
Figura 9 – Diagrama de Corpo Livre do eixo da peneira.



Fonte: Próprio autor.

Posteriormente, a carga pode ser simplificada para uma carga pontual no centro do eixo e o princípio do equilíbrio estático pode ser aplicado.

Figura 10 – Diagrama de Corpo Livre simplificado do eixo da peneira.



Fonte: Próprio autor.

Igualando-se o somatório das forças verticais à zero e adotando o referencial de que forças contrárias à ação da gravidade sejam positivas, obtém-se a Equação [11]:

$$\sum F_y = 0$$

$$R_a + R_b - 3455 = 0$$

$$R_a + R_b = 3455 \text{ N} \quad [11]$$

Em seguida, a condição de que o somatório dos momentos no apoio A seja nulo é aplicada. Adotando como referência o sentido anti-horário como positivo, obtém-se o valor da reação no apoio B:

$$\sum M_a = 0$$

$$- 3455 \cdot 1 + R_b \cdot 2 = 0$$

$$R_b = 1727,5 \text{ N} \quad [12]$$

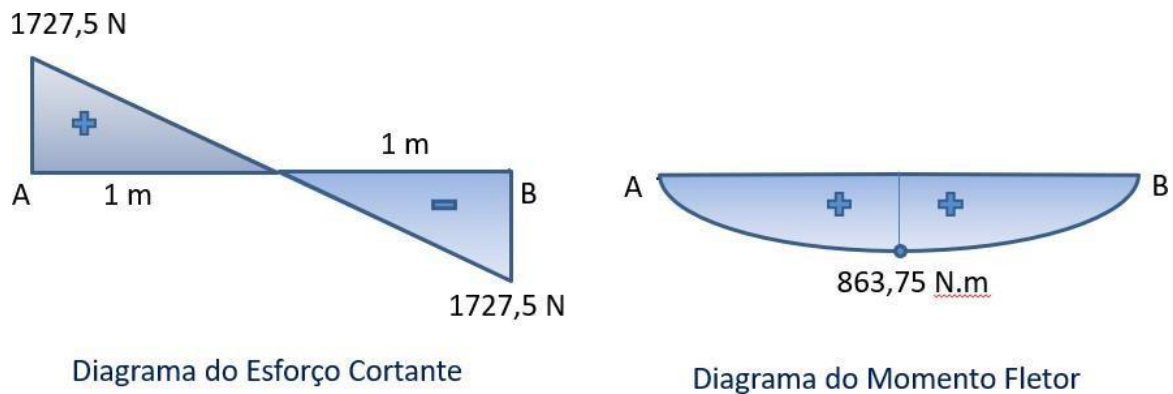
Substituindo a Equação [12] na Equação [11], obtém-se também o valor da reação no apoio A, de mesma magnitude:

$$R_a = 3455 - 1727,5$$

$$R_a = 1727,5 \text{ N}$$

Com base nas Equações [8] e [9], o Diagrama de Esforço Cortante (DEC) e o Diagrama do Momento Fletor (DMF) podem ser confeccionados (Figura 11).

Figura 11 – Diagramas de esforços do eixo da peneira.



Fonte: Próprio autor.

### 2.3.1.1 Fator de correção do carregamento

O eixo da peneira rotativa é submetido a flexo-torção, ou seja, esforços de torção e flexão atuam conjuntamente sobre o mesmo. Portanto, tem-se que:

$$C_{carreg} = 1$$

### 2.3.1.2 Fator de correção do tamanho

Como ainda não se tem o valor do diâmetro do eixo, é necessário fazer uma suposição do mesmo. Caso mais adiante, obtenha-se um valor de diâmetro fora do intervalo de diâmetro

escolhido, calcula-se um novo limite de resistência a fadiga corrigido, mas com o fator de correção relacionado ao intervalo adequado de valores de diâmetro. Para o presente caso, supõe-se que o diâmetro do eixo se situa no segundo intervalo da Tabela 1 ( $7,6 \leq d \leq 50$  mm) e, portanto:

$$C_{tamanho} = 0,85$$

### 2.3.1.3 Fator de correção da superfície

O eixo escolhido para o projeto é de aço SAE 1020 produzido por laminação a quente, portanto, segundo a Tabela 2, os coeficientes A e b para o cálculo do fator de correção devido a superfície do material são 57,7 e  $-0,718$ , respectivamente. Além disso, o limite de resistência à tração do material ( $S_{sut}$ ) é de 400 MPa (SHIGLEY, 2011). Aplicando tais dados à Equação [3], obtém-se:

$$C_{superf} = 57,7 \times (400)^{-0,718}$$

$$C_{superf} = 0,78$$

### 2.3.1.4 Fator de correção da temperatura

A peneira rotativa opera sob condições ambientes, portanto como visto anteriormente, para  $T \leq 450$  °C, tem-se que:

$$C_{temp} = 1$$

### 2.3.1.5 Fator de correção de confiabilidade

Adotando-se uma confiabilidade de 90% para o dimensionamento do eixo e consultando a Tabela 3, obtém-se:

$$C_{temp} = 0,897$$

### 2.3.1.6 Limite de resistência à fadiga não corrigido

Aços com limite de resistência a tração inferior a 1400 Mpa, obedecem a seguinte relação:

$$S'_e = 0,5 S_{sut}$$

$$\therefore S'_e = 0,5 \cdot 400$$

$$S'_e = 200 \text{ MPa}$$

### 2.3.1.7 Limite de resistência à fadiga corrigido

Aplicando na Equação [2] os valores dos coeficientes de correção do limite de resistência à fadiga obtidos nos itens de 4.1.1 à 4.1.5 e o valor do limite de resistência à fadiga não corrigido obtido no item anterior, obtém-se:

$$S_e = 1 \cdot 0,85 \cdot 0,78 \cdot 1 \cdot 0,897 \cdot 200$$

$$S_e \cong 119 \text{ MPa}$$

### 2.3.1.8 Diâmetro do eixo

Aplicando na Equação [4] os valores calculados previamente de momento fletor máximo  $M_f$  e o limite de resistência à fadiga  $S_e$ . Considerando um coeficiente de segurança de 1,5 e um torque de 1100 N.m sobre o eixo da peneira:

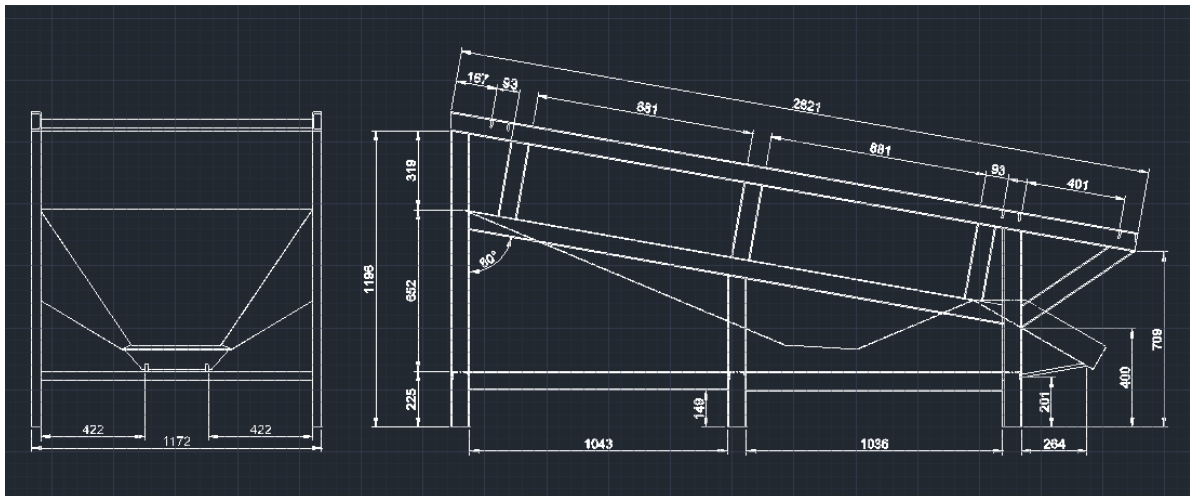
$$d = \sqrt[3]{\frac{32 \cdot 1,5}{\pi} \cdot \sqrt{\left(\frac{1100}{300 \times 10^6}\right)^2 + \left(\frac{863,75}{119 \times 10^6}\right)^2}}$$

$$d \cong 50 \text{ mm}$$

## 2.3.2 Desenhos de montagem e modelagem 3D

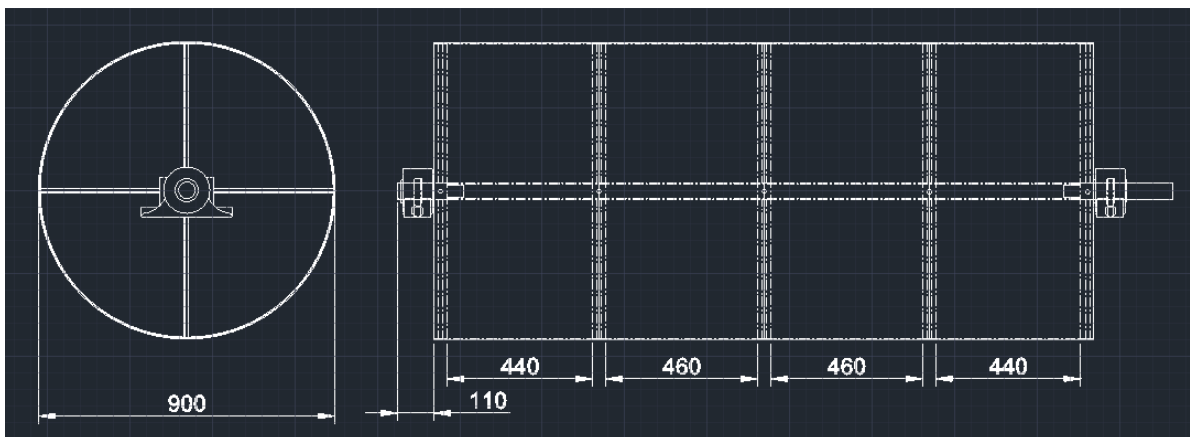
No software Autodesk AutoCAD desenhou-se as vistas necessárias para montagem da estrutura base da peneira (Figura 12) e do cilindro de peneiramento com o eixo (Figura 13).

Figura 12 – Desenho 2D de montagem da estrutura base da peneira.



Fonte: Próprio autor.

Figura 13 - Desenho 2D de montagem do cilindro de peneiramento e eixo.



Fonte: Próprio autor.

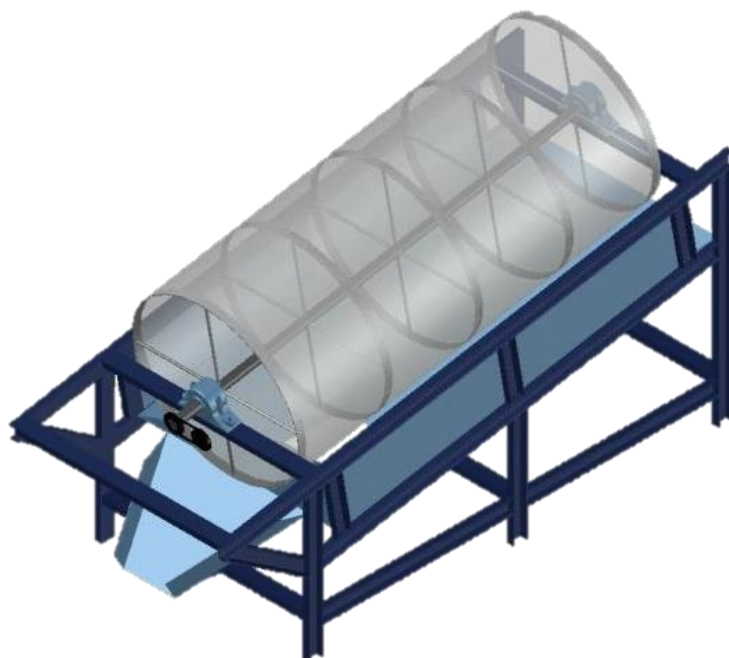
Modelou-se em 3D a peneira rotativa completamente montada, também via Autodesk AutoCAD, nas Figuras 14 e 15, a seguir, ela é representada nas vistas isométricas e na Figura 16 ela pode ser vista lateralmente.

Figura 14 – Vista isométrica 1 da peneira em 3D



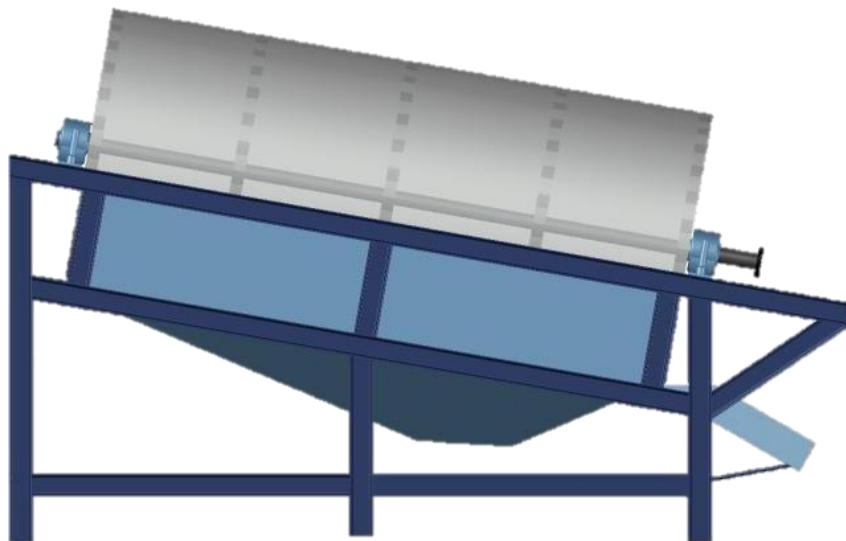
Fonte: Próprio autor.

Figura 15 – Vista isométrica 2 da peneira em 3D



Fonte: Próprio autor.

Figura 16 – Vista lateral da peneira em 3D



Fonte: Próprio autor.

### 2.3.3 Protótipo da peneira rotativa

Após a montagem das peças das Fotografias 1, 2, 3 e 4 e de alguns ajustes necessários, o protótipo da peneira rotativa inclinada é apresentado nas Fotografias 5 e 6 a seguir:

Fotografia 5 – Vista lateral do protótipo



Fonte: Próprio autor.

Fotografia 6 – Vista frontal superior do protótipo



Fonte: Próprio autor.

### 3 CONCLUSÃO

A partir das especificações de projeto pré-estabelecidas e do método de análise de fadiga em eixos sujeitos à esforços de flexo-torção realizou-se o projeto da peneira rotativa inclinada, que foi desenhado no software Autodesk AutoCAD com as vistas necessárias para montagem do dispositivo de peneiramento e modelado também em 3D para melhor visualização e entendimento.

Foi montado um protótipo em uma escala de redução 1:4, para efeito de reproduzir ilustrativamente o equipamento e cada processo de fabricação do mesmo foi acompanhada e registrada.

Em suma, os objetivos propostos foram integralmente atingidos.

**REFERÊNCIAS**

- ANDERY, P. A. **Tratamento de minérios e hidrometalurgia in memoriam professor Paulo Abib Andery**. Recife: Fundação Instituto Tecnológico do estado de Pernambuco, 1980.
- BUDYNAS, R. G.; NISBETT, J. K. **Elementos de máquinas de Shigley**: projeto de engenharia mecânica. 8. ed. Porto Alegre: AMGH, 2011. 1084 p.
- GUPTA, A.; YAN, D.S. **Introduction to mineral processing design and operation**. 2nd ed. Oxford: Elsevier, 2006.
- LIMA, R.M.F.; LUZ, J.A.M. Análise granulométrica por técnicas que se baseiamna sedimentação gravitacional: Lei de Stokes. **Rem**: Rev. Esc. Minas, Ouro Preto, v. 54, n. 2, jun. 2001.
- LUZ, A. B.; SAMPAIO, J. A.; FRANÇA, S. C. A. **Tratamento de minérios**. 5. ed. Rio de Janeiro: CETEM/MCT, 2010. 896 p.
- LUZ, G. **Peso específico da brita**: 0, 1, 2, 3, 4 granítica calcária. 2018. Disponível em: <https://www.materiais.gelsonluz.com/2018/09/peso-especifico-brita.html>. Acesso em: 05 fev. 2022.
- NORTON, R. L. **Projeto de máquinas**: uma abordagem integrada. 4. ed. Porto Alegre: Bookman, 2013.
- WILLS, B.A.; NAPIER-MUNN, T.J. **Mineral processing technology**: an introduction to the practical aspects of ore treatment and mineral recovery. 7th ed. Amsterdam: Elsevier Science and Technology Books, 2006. p. 186-191.

**BIBLIOGRAFIA CONSULTADA**

COLLINS, J. C. **Projeto mecânico de elementos de máquinas**: uma perspectiva de prevenção de falhas. 2. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2013. 740 p.

GALÉRY, R.; VALADÃO, G. E. S.; MONTENEGRO, L. C. M. Separação por tamanho. *In*: VALADÃO, G. E. S.; ARAÚJO, A. C. A. **Introdução ao tratamento de minérios**. Belo Horizonte: UFMG, 2007. p. 61-84.

HILDEN, M. M. A dimensional analysis approach to the scale-up and modeling of industrial screens. **JKMRC**, jan. 2008.

SILVA, F. A.; CHAVES, C. A.; GUIDI, E. S. Análise de falha por fadiga em eixo de transmissão utilizando o método dos elementos finitos. **Exacta** – EP, São Paulo, v. 14, n. 2, p. 207-219, 2016.