

UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO  
ESCOLA DE ENGENHARIA DE SÃO CARLOS

GUSTAVO GIORDANO JANE

Avaliação paramétrica de cubas de moinhos vibratórios para processamento de  
barbotinas cerâmicas.

São Carlos

2018



GUSTAVO GIORDANO JANE

Avaliação paramétrica de cubas de moinhos vibratórios para processamento de barbotinas cerâmicas.

Monografia apresentada ao Curso de Engenharia de Materiais e Manufatura, da Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo, como parte dos requisitos para obtenção do título de Engenheiro de Materiais.

Orientador: Prof. Dra. Zilda Castro Silveira

VERSÃO CORRIGIDA

São Carlos

2018

AUTORIZO A REPRODUÇÃO TOTAL OU PARCIAL DESTE TRABALHO, POR QUALQUER MEIO CONVENCIONAL OU ELETRÔNICO, PARA FINS DE ESTUDO E PESQUISA, DESDE QUE CITADA A FONTE.

Ficha catalográfica elaborada pela Biblioteca Prof. Dr. Sérgio Rodrigues Fontes da EESC/USP com os dados inseridos pelo(a) autor(a).

G 982a	<p>Giordano Jane, Gustavo</p> <p>Avaliação paramétrica de cubas de moinhos vibratórios para processamento de barbotinas cerâmicas. / Gustavo Giordano Jane; orientadora Zilda Castro Silveira. São Carlos, 2018.</p> <p>Monografia (Graduação em Engenharia de Materiais e Manufatura) -- Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo, 2018.</p> <p>1. Moinho vibratório. 2. Cuba. 3. . Análise paramétrica. 4. Elementos de moagem. 5. Densidade de empacotamento. I. Título.</p>
-----------	--

Eduardo Graziosi Silva - CRB - 8/8907

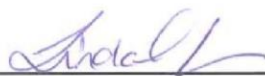


## FOLHA DE APROVAÇÃO

<b>Candidato:</b> Gustavo Giordano Jane
<b>Título do TCC:</b> <i>Avaliação paramétrica de cubas de moinhos vibratórios para processamento de barbotinas cerâmicas</i>
<b>Data de defesa:</b> 30/11/2018

<b>Comissão Julgadora</b>	<b>Resultado</b>
Professor Doutor Zilda de Castro Silveira (orientador)	APROVADO
Instituição: EESC - SEM	
Professor Doutor Eduardo Bellini <i>Jeneira</i>	APROVADO
Instituição: EESC - SMM	
Pesquisador Joaquim Manoel Justino Netto	APROVADO
Instituição: EESC - SEM	

Presidente da Banca: **Professor Doutor Zilda de Castro Silveira**



(assinatura)



## **AGRADECIMENTOS**

Agradeço a Deus, acima de tudo, por estar sempre me abençoando e iluminando meu caminho, e pela força para encarar meus desafios diários.

Agradeço aos meus pais, Raquel e Heitor, por todo apoio e incentivo, e por nunca medirem esforços para me ajudar a alcançar meus sonhos. Às minhas irmãs Ana Paula e Estela, pela amizade e compreensão. E agradeço à Thaísa pelo carinho e companheirismo, sempre me motivando e alegrando nos dias mais difíceis.

Aos amigos conquistados na EESC/USP, que fizeram todos esses anos serem possíveis. E aos amigos de longa data, pelo apoio. Obrigada por cada abraço, cada palavra de carinho e cada momento juntos.

Agradeço à orientadora, Profa. Dra. Zilda Castro, pelo suporte, dedicação e atenção oferecidos durante o desenvolvimento deste projeto.

Agradeço a todos os professores do curso, pelos ensinamentos e por terem contribuído para o meu crescimento acadêmico.

Agradeço à empresa Engecer Ltda, principalmente à minha gestora, e mestre em engenharia de materiais, Tatiani Falvo e ao supervisor Jair Júlio Factor, pela oportunidade de estágio, pelos ensinamentos e pela experiência oferecida.

Agradeço a todos que de alguma forma fizeram parte desse trabalho e contribuíram para que ele fosse possível. Muito obrigado.



## RESUMO

JANE, G. G. **Avaliação paramétrica de cubas de moinhos vibratórios para processamento de barbotinas cerâmicas.** 2018. 89 f. Monografia (Trabalho de Conclusão de Curso) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2018.

Os objetivos gerais foram o estudo sobre os diferentes tipos de moinhos empregados no processamento de materiais cerâmicos e a análise paramétrica da cuba de um moinho vibratório para o processamento de barbotinas a cerâmicas. A produção do pó e da barbotina podem ser consideradas as primeiras etapas no que diz respeito à manufatura de peças cerâmicas, sendo ambos fundamentais e decisivos para o bom andamento das etapas subsequentes. Dada a importância e a responsabilidade presentes no manejo do pó e da barbotina, buscou-se selecionar o tipo de moinho mais adequado. Dessa forma ponderou-se diferentes aspectos de projeto considerados relevantes, tais como a taxa de moagem e a granulometria, para atender a demanda pela produção de forma personalizada. No projeto avaliou-se diferentes geometrias para o jarro (vaso ou cuba) do moinho, foi estudado o grau de preenchimento com elementos de moagem considerando-se sua imprecisão em relação à geometria da cuba, realizou-se simulações estruturais estáticas, análise de frequência natural de vibração e dos diferentes modos de vibrar da estrutura do jarro.

Palavras-chave: Moinho vibratório. Cuba. Análise paramétrica. Elementos de moagem. Densidade de empacotamento. Cerâmicas.



## **ABSTRACT**

**JANE, G. G. Parametric analysis of a vibratory mill reservoir applied for ceramic slurries processing.** 2018. 89 f, Monografia (Trabalho de Conclusão de Curso) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2018.

The general objective was the study of the different kind of mills, which are appropriated for ceramics processing, providing an overview into the topic. Furthermore, the parametric analysis of a vibratory mill reservoir, applied to ceramic slurries processing, is also the aim of this work. The powder and slurries production are considered the first steps in the manufacturing of technical ceramics parts. The final product quality and the further steps of manufacturing, such as pressing, green machining and sintering, highly depend on the properties of the powder and the slurries. Given such importance, the selection of the mill configuration, must be done under technical criteria selection in order to optimize the milling step in the production. Milling rate, product grain size and production capability are aspects taken into account to the appropriated mill type selection. In the project, different geometries were evaluated for the reservoir, the grinding elements geometry and package density were studied, static structural simulations were performed and natural frequency analysis and different modes of vibration were analyzed.

**Keywords:** Vibratory mill. Reservoir. Parametric analysis. Grinding media. Packing density. Ceramic slurries.



## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Diferentes tipos de aplicações dos materiais cerâmicos e sua equivalente contribuição percentual no valor de mercados dos anos de 2013 à 2024.....	29
Figura 2 – Representação esquemática dos mecanismos de mistura.....	32
Figura 3 – Efeito da porosidade inicial e do tamanho de partícula na porosidade final para Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> . .....	34
Figura 4 – a) Representação esquemática do funcionamento de um moinho de jatos; b) Moinho de Jatos comercial NETZSCH-Feinmahltechnik. ....	36
Figura 5 – Mecanismo de moagem de um moinho do tipo planetário .....	38
Figura 6 – Configuração de um moinho de atrito, evidenciando-se o eixo central com os pinos agitadores, o barril e os elementos de moagem. ....	39
Figura 7 - a) Representação esquemática do efeito da moagem com esferas em moinhos de jarros. b) Gráfico de distribuição de tamanho de partícula acumulado de um material que tem uma faixa ampla de partículas .....	40
Figura 8 – Movimento em cascata dos elementos de moagem esféricos no moinho de bolas rotativo cilíndrico (NEIKOV, 2009) .....	41
Figura 9 – a) Representação de um moinho de bolas de jarro cônico b) Figura de um moinho de bolas de jarro cilíndrico comercial.....	42
Figura 10 – a) Impacto em linha dos elementos de moagem cilíndricos, fratura preferencial das partículas b) Gráfico característico de um material de distribuição de tamanho de partículas estreita, obtido após moagem no moinho vibratório (FORTULAN, 1996) .....	43
Figura 11 – Representação esquemática de um moinho vibratório, do tipo excêntrico, e a indicação de alguns componentes.....	45
Figura 12 – Moinho vibratório, do tipo excêntrico, fabricado pela empresa Siebtechnik .....	45
Figura 13 – Representação esquemática da configuração de montagem de um moinho vibratório do tipo concêntrico. ....	46
Figura 14 – Representação esquemática em corte da carcaça do motor e seus componentes, evidenciando-se também os contrapesos acoplados às extremidades dos eixos do motor.....	47
Figura 15 – Modelo do moinho vibratório .....	47
Figura 16 – a) Esboço da configuração estrutural do moinho vibratório b) Desenho em CAD do projeto do mini moinho vibratório de múltiplos jarros (CARVALHO, 2007).....	48
Figura 17 – Dependência da densidade de empacotamento em relação à frequência de oscilação, para diferentes medidas de diâmetro (QUAN QIAN, 2016).....	51



Figura 18 – Relação entre a densidade de empacotamento e a fração 1/D, para diferentes razões de aspecto dos elementos cilíndricos.....	52
Figura 19 – Relação entre área específica e tempo de moagem para diferentes tipos de moinhos .....	53
Figura 20 – Relação entre tamanho de partícula inicial e tamanho de partícula final para os diferentes tipos de moinhos .....	54
Figura 21 – Comparação de diferentes tipos de moinhos perante diferentes critérios de projeto. ....	58
Figura 22 – a)Matriz morfológica elaborada para o equipamento de moagem voltado para o processamento de barbotinas à base de zircônia, com círculos indicando a configuração escolhida. b) Croqui d a montagem. ....	60
Figura 23: Fluxograma das etapas de análise .....	61
Figura 24 – a) Configuração 1: Geometria cilíndrica simples b) Configuração 2: Geometria cilíndrica com haste central c) Configuração 3: Geometria de base cônica e haste central .....	61
Figura 25 – Representação esquemática da configuração 1 da cuba, onde evidencia-se o preenchimento com elementos de moagem cilíndricos e os parâmetros geométricos .....	62
Figura 26 – Representação esquemática da configuração 2 (preenchido com elementos cilíndricos e barbotina) e os parâmetros geométricos envolvidos.....	64
Figura 27 – Configuração 3 da cuba e seus principais parâmetros geométricos.....	66
Figura 28 – Comparativo entre as diferentes Configurações das cubas .....	67
Figura 29 – Comparativo entre configurações, relacionando-se o diâmetro da cuba e a densidade de empacotamento dos elementos cilíndricos. ....	68
Figura 30 – Cotas da configuração 1 .....	69
Figura 31 – Correlação entre área superficial interna da cuba e diâmetro da cuba para diferentes medidas de diâmetro.....	70
Figura 32 – Correlação de porcentagem de superestimação da densidade de empacotamento e a variação percentual de superestimação do diâmetro da cuba (Dc). Para e=0,72; e=0,6; e=0,5 .....	72
Figura 33 – Correlação de porcentagem de superestimação da densidade de empacotamento e a variação de volume de barbotina em pontos percentuais. Para e=0,72; e=0,6; e=0,5 .....	73
Figura 34 – Velocidade de movimentação dos elementos de moagem em relação ao eixo de simetria da cuba. ....	74
Figura 35 – Representação esquemática da base inclinada e da captação de barbotina pelo furo (d <sub>cb</sub> ).....	75



Figura 36 – Relação entre o diâmetro da cuba ( $D_c$ ) e a razão de aspecto ( $K$ ), para diferentes valores de densidade de empacotamento ( $e$ ). .....	76
Figura 37 – Relação da área lateral interna da cuba com a constante geométrica $x$ , para diferentes valores de diâmetro. O valor da série $D=500$ , corresponde-se ao eixo secundário, à direita. ....	77
Figura 38 – Revestimento cerâmico de um moinho de bolas.....	79
Figura 39 – Representação da vista isométrica em corte, evidencia-se o revestimento cerâmico aplicado à cuba metálica.....	79
Figura 40 – Geração da malha do modelo, condições de engaste e carregamentos. ....	82
Figura 41 – Análise estrutural estática. Tensão de Von-Mises .....	83
Figura 42 – Simulação estática estrutural da cuba. Campo de deslocamentos.....	84
Figura 43 – Rigidez da mola versus Deformação, para 7, 10 e 12 molas. ....	85
Figura 44 – Modo de vibrar relativo à primeira frequência de vibração. ....	87



## LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Materiais para revestimento de câmara de moagem e meios de moagem.....	37
Tabela 2: Rotação e amplitude de operação para diferentes categorias de moinho .....	44
Tabela 3: Classificação da granulometria do produto final de moagem para diferentes tipos de moinhos. Partículas finas com tamanho inferior à 100µm, partículas ultrafinas inferior à 10 µm. ....	54
Tabela 4: Classificação quantitativa da granulometria quanto aos diferentes tipos de moinhos ] .....	55
Tabela 5: Parâmetros geométricos da configuração 1 (geometria cilíndrica simples).....	62
Tabela 6: Constantes e parâmetros de entrada para o cálculo do diâmetro da cuba.....	63
Tabela 7: Parâmetros geométricos referentes à configuração 2 (geometria cilíndrica com haste central).....	65
Tabela 8: Constante geométricas e dados de entrada da configuração 3 da geometria da cuba. ....	66
Tabela 9: Constantes geométricas adotadas para a configuração número 3.....	78
Tabela 10: Parâmetros geométrico internos da cuba .....	
Tabela 11: Cotas referentes à parte metálica da cuba.....	80
Tabela 12: Parâmetros de carregamento referente à massa dos elementos de moagem.....	81
Tabela 13: Parâmetros de carregamento referente à massa de barbotina .....	81
Tabela 14: Forças externas atuantes na cuba.....	82
Tabela 15: Parâmetros da mola e símbolos .....	86
Tabela 16: Frequência de ressonância da cuba.....	87



## **LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS**

DTP	Distribuição de Tamanho de Partículas
CAD	Computer Aided Design
DEM	Discrete Element Method



## LISTA DE SÍMBOLOS

$N$	Rotação crítica aplicada ao moinho de bolas [rpm]
$D_c$	Diâmetro do jarro do moinho de bolas [m]
$D_{\min}$	Diâmetro mínimo das esferas [mm]
$D_{\max}$	Diâmetro máximo das partículas em processamento [mm]
$\rho$	Densidade [g/cm <sup>3</sup> ]
$W_o$	Frequência natural de vibração [Hz]
$K_m$	Constante elástica axial da mola
$K_{mt}$	Constante elástica transversal da mola
$V_{\text{total}}$	Volume total interno da cuba cilíndrica [mm <sup>3</sup> ]
$V_{\text{útil}}$	Volume preenchido por barbotina e elementos de moagem [mm <sup>3</sup> ]
$E$	Módulo de elasticidade [MPa]
$M_b$	Massa de barbotina [Kg]
$D_c$	Diâmetro da cuba [mm]
$L_c$	Comprimento da cuba [mm]
$l_v$	Comprimento vazio da cuba [mm]
$d_m$	Diâmetro da haste central cilíndrica [mm]
$l_m$	Comprimento da haste central cilíndrica [mm]
$h$	Altura do tronco de cone, presente na base da cuba [mm]
$e$	Densidade de empacotamento dos elementos de moagem [adimensional]
$K$	Razão de aspecto da cuba [adimensional]
$a$	Constante geométrica da cuba [adimensional]
$b$	Constante geométrica da cuba [adimensional]
$x$	Constante geométrica da cuba [adimensional]
$y$	Constante geométrica da cuba [adimensional]
$w$	Porcentagem de superestimação da densidade de empacotamento [adimensional]
$\varphi$	Ângulo da base da cuba[°]
$\dot{R}$	Vazão volumétrica [m <sup>3</sup> /s]
$d_{am}$	Diâmetro do arame da mola [mm]
$G$	Módulo de Cisalhamento [MPa]
$D_{mm}$	Diâmetro médio da mola [mm]
$N_a$	Número de espiras ativas da mola [adimensional]



## SUMÁRIO

<b>1. INTRODUÇÃO .....</b>	<b>29</b>
<b>2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....</b>	<b>31</b>
2.1 Processo de Moagem .....	31
2.2 Mecanismos de mistura .....	32
2.3 Partículas cerâmicas.....	33
2.4 Tipos de Moinhos .....	35
2.5 Moinho de jatos .....	35
2.6 Moinhos de elementos de moagem.....	36
2.6.1 Moinhos planetários .....	37
2.6.2 Moinhos de atrito.....	38
2.6.3 Moinho de bolas .....	39
2.6.4 Moinho vibratório.....	42
2.7 Metodologia de projeto.....	48
2.8 Vibrações .....	49
2.9 Densidade de empacotamento de partículas .....	50
<b>3. AVALIAÇÃO COMPARATIVA DE DESEMPENHO .....</b>	<b>52</b>
3.1 Taxa de Moagem .....	52
3.2 Granulometria .....	53
3.3 Capacidade de Produção .....	55
3.4 Manuseabilidade .....	55
3.5 Complexidade de Fabricação.....	56
3.6 Consumo Energético.....	56
3.7 Tabela Comparativa.....	57
<b>4. DEFINIÇÃO DA GEOMETRIA DA CUBA.....</b>	<b>58</b>
4.1 Requisitos de projeto .....	59
4.2 Projeto preliminar .....	60
4.2.1 Estudo da Geometria da Cuba .....	61

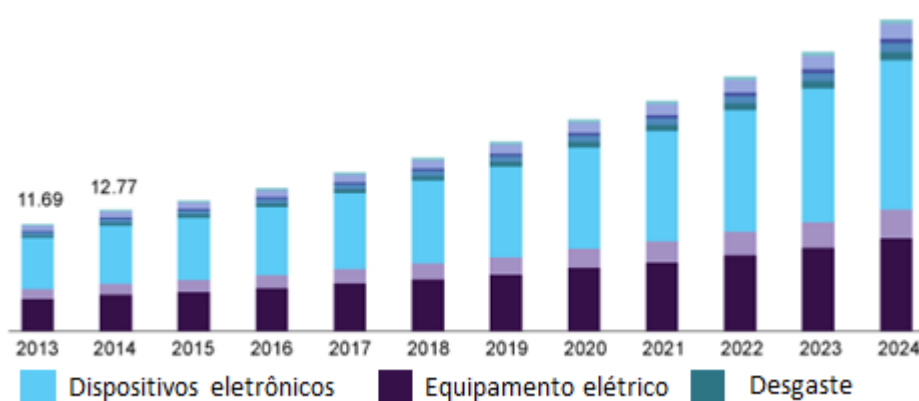
4.2.2	Comparativo entre as configurações da cuba .....	67
4.2.3	Verificação de resistência da cuba.....	80
4.2.4	Análise Modal .....	84
<b>5.</b>	<b>CONCLUSÕES E TRABALHOS FUTUROS .....</b>	<b>89</b>
	<b>REFERÊNCIAS .....</b>	<b>91</b>



## 1. INTRODUÇÃO

A indústria das cerâmicas técnicas foi detentora de uma parcela de mercado equivalente à 62,5 bilhões de dólares no ano de 2016, destacando-se o consumo na China e Índia. A Figura 1 revela dados de consumo das cerâmicas técnicas de anos passados e também faz previsões para o futuro no que diz respeito às diferentes aplicações dos materiais cerâmicos e suas respectivas contribuições percentuais de valor de mercado dos materiais cerâmicos. (Grandview resarch, 2018).

Figura 1 – Diferentes tipos de aplicações dos materiais cerâmicos e sua equivalente contribuição percentual no valor de mercados dos anos de 2013 à 2024



Grandview resarch, 2018

A alta do mercado das cerâmicas de engenharia tem suas causas enraizadas nas propriedades exibidas por alguns desses materiais. Destacam-se a alta resistência ao desgaste, baixo coeficiente de expansão térmica, alta estabilidade química, baixa condutibilidade térmica e elétrica, entre outras. Tais propriedades garantem uma vasta gama de aplicações, na resistência ao desgaste, inércia química, isolamento elétrico e de calor, etc. Os óxidos compõem a categoria de materiais cerâmicos mais produzidos atualmente, demonstrando sua importância na indústria das cerâmicas tradicionais e principalmente na área das cerâmicas avançadas. A  $\alpha$ - $\text{Al}_2\text{O}_3$ , por exemplo, também conhecida como Corundum, possui a estrutura cristalina hexagonal. Em geral as cerâmicas pode ser encontradas na forma policristalina, podendo também formar monocristais. (Grandview resarch, 2018).

No que se refere ao volume de produção destaca-se o óxido de alumínio (ou alumina), que é a cerâmica mais usada em aplicações estruturais (RALF RIEDEL, 2010). As aplicações industriais da alumina são diversas em decorrência de suas propriedades físicas excelentes. Pode-se aplica-la como: material abrasivo, material refratário, material resistente ao desgaste e como suporte catalítico (SHOGO ADACHI, 2015).

Já no que diz respeito à manufatura de peças cerâmicas, a correta utilização dos parâmetros de processamento é uma condição importantíssima para que se consiga obter as propriedades alvo dos materiais cerâmicos. Partículas pequenas, com tamanho na faixa de 0,1-10  $\mu\text{m}$ , normalmente são necessárias para as aplicações em cerâmicas avançadas, pois tais pós apresentam a reatividade necessária para a obtenção de um produto final capaz de ser devidamente sinterizado e densificado. Nesse sentido existe uma demanda da indústria cerâmica no que diz respeito à máquinas capazes de promover a diminuição do tamanho de partículas e homogeneização de pós e barbotinas. (FORTULAN, 1996)

A realização do presente trabalho tem como objetivo o desenvolvimento de uma análise de um moinho vibratório que opere em escala industrial, que seja capaz de moer aproximadamente 25 Kg de barbotina por batelada. Tal equipamento deve ser capaz de processar o material e obter partículas finas na ordem de 7 a 0,1  $\mu\text{m}$  de tamanho de partícula em altas taxas de moagem. Deste modo o moinho vibratório mostrou-se uma opção interessante.

O desenvolvimento do presente trabalho reside na demanda por moagem de materiais, esses que são empregados no processamento de cerâmicas técnicas. Buscou-se analisar as características de uma máquina capaz de processar barbotinas diferentes materiais: tais como alumina e zircônia, e que possa obter partículas com uma distribuição de tamanho na qual o D50, diâmetro relativo ao percentual acumulado de 50 %, seja inferior à 10  $\mu\text{m}$ . Foi estabelecido um procedimento de cálculo para orientar o projeto mais eficiente de moinhos vibratórios.

## 2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

### 2.1 Processo de Moagem

. A demanda por pós finos e ultrafinos vem crescendo em diversos segmentos da indústria destacando-se a indústria cerâmica e na metalurgia do pó. A moagem é o processo mais antigo utilizado para a redução do tamanho de partículas sólidas, sendo amplamente utilizado para obtenção de pós cerâmicos (principalmente óxidos) e metais duros (NEIKOV, 2009).

Os principais objetivos do processo de moagem incluem a diminuição do tamanho de partícula, alteração na forma das partículas, quebra de aglomerados, homogeneização de materiais e também a alteração de propriedades (densidade, capacidade de fluir, reatividade química).

O processo de moagem sujeita as partículas à diferentes condições de processamento, destacando-se: a ruptura, a deformação e a quebra de aglomerados. Em alguns casos o processo de moagem também é capaz de provocar transformações polimórficas nos sólidos cristalinos (NEIKOV, 2009).

Existem quatro principais tipos de forças atuantes no material particulado durante a moagem:

- Impacto: Trata-se de forças atuantes no instante do contato entre objetos, envolvendo a conservação do momento linear.
- Atrito: As forças de atrito são originárias da fricção entre as partículas.
- Cisalhamento: O cisalhamento consiste da clivagem ou corte das partículas, em geral esse tipo de esforço está vinculado à forças tangenciais.
- Compressão: Trata-se da aplicação de esforços compressivos lentos

A ruptura das partículas é uma característica à moagem de materiais duros e frágeis, tais como os materiais cerâmicos. O processo de fratura (rompimento das partículas sólidas) passa por diversas etapas:

- Acúmulo de defeitos, resultando em concentradores de tensão
- Nucleação de micro trincas, proporcionando a descontinuidades na estrutura cristalina do material.

- Crescimento e junção das micro trincas, formando uma trinca principal
- Fratura do sólido em uma ou diversas partes.

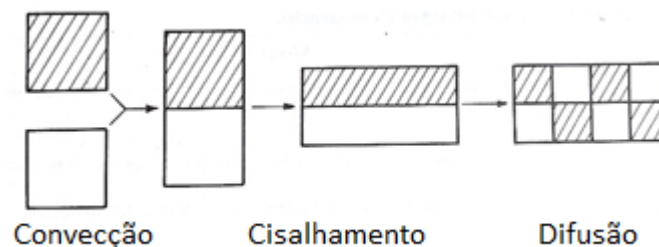
## 2.2 Mecanismos de mistura

Além da diminuição do tamanho de partícula, espera-se, também, que ocorra a homogeneização do material durante o processo de moagem. Para que isso ocorra existem três mecanismos a partir dos quais pode-se realizar um processo de homogeneização, sendo eles: convecção, cisalhamento e difusão.

- No mecanismo de convecção as partículas são deslocadas desordenadamente de uma região para outra, combatendo o efeito convectivo.
- O mecanismo de cisalhamento atua de forma a aumentar a interface entre os componentes deformando-os.
- No mecanismo de difusão as partículas são intercambiadas entre as vizinhanças microscópicas da mistura de forma aleatória.

A Figura 2 ilustra esquematicamente os mecanismos.

Figura 2 – Representação esquemática dos mecanismos de mistura



Fonte: (REED, 1988)

A importância relativa de cada um dos três mecanismos depende do tipo do equipamento (design), do comportamento reológico do material e do *input* de energia aplicado na mistura. A contribuição do mecanismo convectivo geralmente é obtida a partir de dispositivos mecânicos tais como lâminas e rotores que promovem o movimento e desorientação das partículas. Já o cisalhamento é obtido através do movimento relativo entre superfícies sem que haja escorregamento relativo. Tensões de cisalhamento de grande magnitude podem dispersar aglomerados e misturar materiais viscosos em escala microscópica. No que se refere à difusão, tal mecanismo é empregado através de fluxos turbulentos e cavitação proporcionando a dispersão de aglomerados. Materiais que fluem facilmente, tais como pós cerâmicos e

suspensões de baixa viscosidade, podem ser misturados por convecção, cisalhamento e difusão. (REED, 1988)

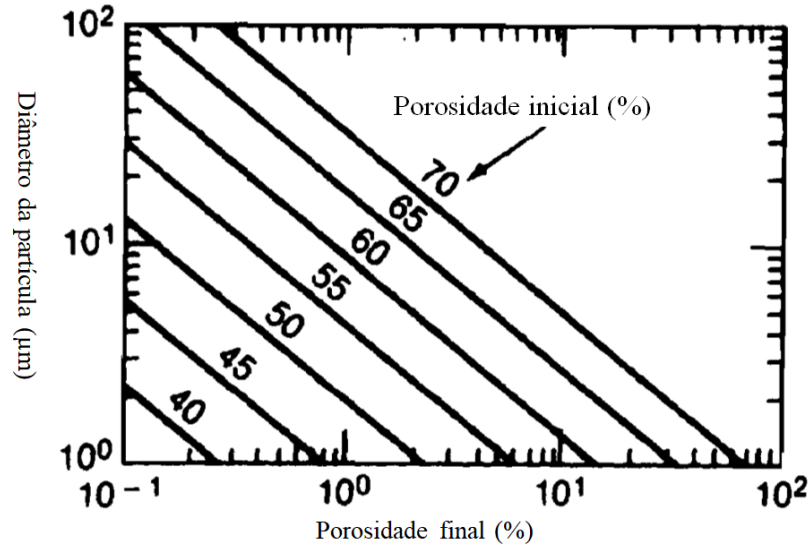
Nesse caso os equipamentos que operam por difusão geralmente são mais baratos, simples de operar e de maior vida útil. Já em líquidos viscosos, suspensões viscosas e pastas que resistem ao fluxo pode-se empregar o mecanismo convectivo e principalmente o cisalhamento. (REED, 1988)

### **2.3 Partículas cerâmicas**

O processamento das cerâmicas avançadas está diretamente ligado às características das partículas que formam o pó. Um dos parâmetros do pó que confere uma grande influência no processamento dos materiais cerâmicos é a distribuição do tamanho de partícula. No geral as técnicas de processamento visam uniformidade do pó e maior grau de empacotamento, para que a retração e a porosidade após o processo de densificação sejam minimizadas. Considerando-se um único tamanho de partícula, não obtém-se um bom grau de empacotamento. No melhor dos casos atinge-se aproximadamente 30% de porosidade. Dessa forma é necessário que o pó cerâmico detenha uma faixa razoavelmente ampla de tamanhos de partículas (RICHERSON, 1992).

Partículas cerâmicas reais possuem, naturalmente, formatos irregulares e não exibem um empacotamento ideal. Nas cerâmicas verdes é comum observar valores de porosidade superiores a 35% podendo atingir até 50%. Elevadas porosidades em peças verdes são difíceis de eliminar durante a sinterização, tornando-se ainda mais difícil para partículas maiores. Tal comportamento pode ser ilustrado pelo gráfico indicado pela Figura 3.

Figura 3 – Efeito da porosidade inicial e do tamanho de partícula na porosidade final para  $\text{Al}_2\text{O}_3$ .



Fonte: Adaptado de (RICHERSON, 1992).

Baixa porosidade e grãos finos são características que corroboram para as propriedades de interesse das cerâmicas, por exemplo: dureza e inércia química. No entanto, existem casos nos quais há interesse pela porosidade elevada e partículas grandes, como exemplo pode-se citar os materiais refratários, que devem exibir baixa condutividade térmica e resistência ao choque térmico (RICHERSON, 1992).

A reatividade do pó cerâmico também é um aspecto importante no que se refere à sinterização de peças. A força motriz do processo de densificação é a troca da energia livre de superfície pela interface no contorno de grão. Partículas pequenas com elevada área superficial detêm elevada energia livre de superfície, tal condição é termodinamicamente favorável para que as partículas liguem-se umas às outras diminuindo a área superficial. Partículas pequenas, de diâmetro inferior a  $1 \mu\text{m}$ , podem oferecer resultados de densidade relativa próxima à 100% quando sinterizadas em altas temperaturas. (RICHERSON, 1992).

Adicionalmente, o efeito do tamanho e distribuição de tamanho de partícula podem interferir na temperatura e tempo de sinterização. Tipicamente, pós mais finos possuem maior área superficial e necessitam de temperaturas e tempos de sinterização menores. A permanência em altas temperaturas por períodos de tempo grandes favorece o crescimento de grão, o que pode resultar na perda de resistência mecânica. É desejável minimizar o crescimento de grão, para isso é preferível escolher um pó que densifique rapidamente (RICHERSON, 1992).

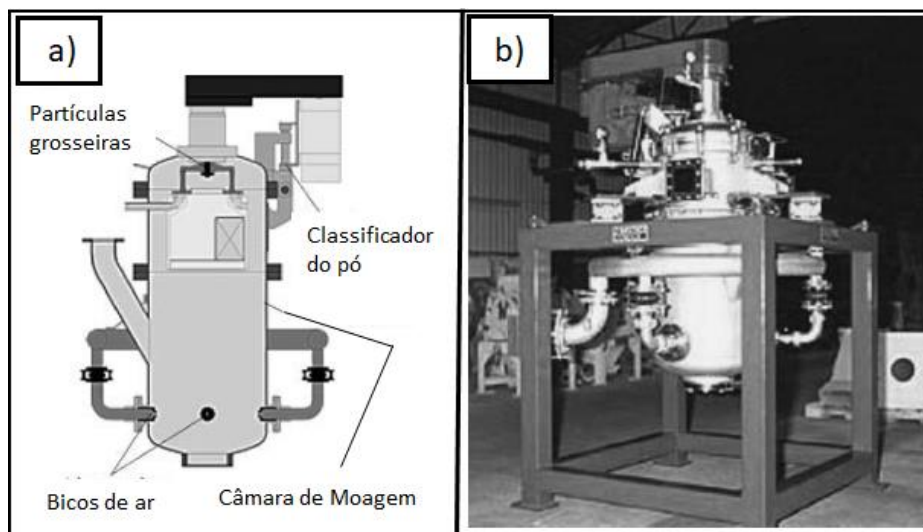
## 2.4 Tipos de Moinhos

Existem diferentes tipos de moinhos capazes de atender aos propósitos de moagem requeridos no âmbito do processamento cerâmico. É possível categorizá-los quanto a presença de elementos de moagem. Os elementos de moagem podem apresentar geometrias variadas, principalmente esférica e cilíndrica, tendo como principal função a atribuição de impacto, forças compressivas e cisalhamento às partículas em processamento. Os elementos de moagem são agitados, rotacionados ou submetidos à vibração, conforme a configuração do moinho. São constituídos de materiais duros, como aços duros ou cerâmicas. Entretanto existem também configurações de moinho capazes de operar sem elementos de moagem, que incorporam outros princípios ao funcionamento do equipamento (NEIKOV, 2009).

## 2.5 Moinho de jatos

O moinho de jatos, ou moinho *jet mill*, difere bastante dos moinhos de elementos de moagem no que se refere ao princípio de funcionamento. A energia de moagem é proveniente de um meio gasoso fortemente agitado (SIDOR, 2005). As partículas a serem processadas são acelerados por meio de fluxos de gás direcionados ao centro da câmara de moagem, onde as partículas colidem-se umas às outras, de modo autógeno, ou seja sem a necessidade de adição de elementos de moagem (NEIKOV, 2009). A alta velocidade das partículas proporciona grandes energias de impacto, levando à quebra de aglomerados e fratura de partículas. A figura 4 indica a representação esquemática de um moinho deste tipo.

Figura 4 – a) Representação esquemática do funcionamento de um moinho de jatos; b) Moinho de Jatos comercial NETZSCH-Feinmahltechnik.



Fonte: Adaptado (NEIKOV, 2009)

O moinho de jatos conta ainda um mecanismo de classificação de partículas que direciona as partículas grosseiras para, mais uma vez, serem aceleradas pelos bicos de ar, enquanto que as partículas finas são segregadas. Em alguns equipamentos a classificação das partículas finas é realizada por classificador dinâmico à ar, que permite o controle do tamanho de partícula desejado (NEIKOV, 2009).

## 2.6 Moinhos de elementos de moagem

Nesta categoria de moinhos a energia de moagem é transferida aos materiais em processamento através dos elementos de moagem, sendo esses esferas ou cilindros. Os moinhos podem ser categorizados de acordo com o tipo de movimentação que é dado ao jarro. Existem três principais tipos, os moinhos vibratórios, moinhos planetários e os moinhos rotativos (moinho de bolas convencional) (NEIKOV, 2009).

O material utilizado para os elementos de moagem e para o revestimento da câmara de moagem deve ser selecionado conforme a aplicação. A densidade do material e o tamanho dos elementos esféricos corroboram positivamente para a energia de impacto. A Tabela 1 relaciona diferentes materiais de revestimento com suas densidades e resistência à abrasão. No caso de elementos esféricos, a utilização de esferas de um único tamanho induz a formação de uma trajetória definida durante o processo de moagem, o que é ruim em termos de moagem. Assim,

deve-se utilizar esferas de tamanhos diferentes para conferir certa aleatoriedade às colisões entre os elementos, a fim de proporcionar uma moagem mais homogênea (BALAZ, 2008).

Tabela 1 – Materiais para revestimento de câmara de moagem e meios de moagem

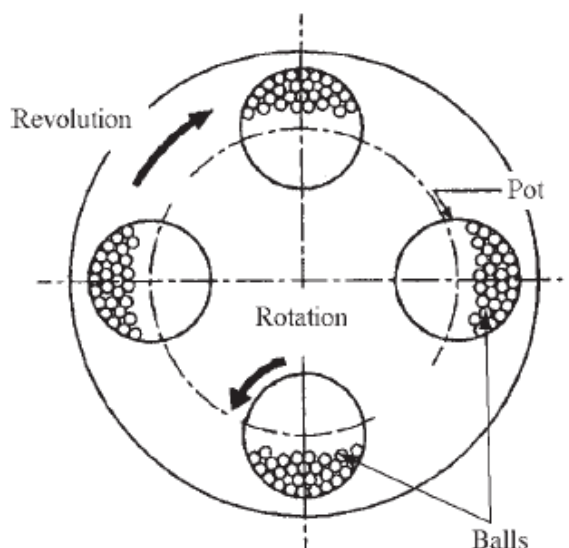
<b>Material</b>	<b>Composição Majoritária</b>	<b>Densidade (<math>\frac{g}{cm^3}</math>)</b>	<b>Resistência à abrasão</b>
Sílica	SiO <sub>2</sub>	2,65	Boa
Corundum	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	>3,8	Razoavelmente boa
Óxido de Zircônia	ZrO <sub>2</sub>	5,7	Muito boa
Aço Inoxidável	Fe, Cr, Ni	7,8	Razoavelmente boa
Aço Temperado	Fe, Cr	7,9	Boa
Carbeto de Tungstênio	WC	14,7-14,9	Muito boa

Fonte: (BALAZ, 2008)

### 2.6.1 Moinhos planetários

Os moinhos planetários têm seu mecanismo de moagem estabelecido pela ação da força centrífuga. A Figura 5 demonstra uma representação esquemática da configuração de um moinho planetário. Observa-se uma base, em forma de disco, na qual os vasos de moagem são posicionados.

Figura 5 – Mecanismo de moagem de um moinho do tipo planetário



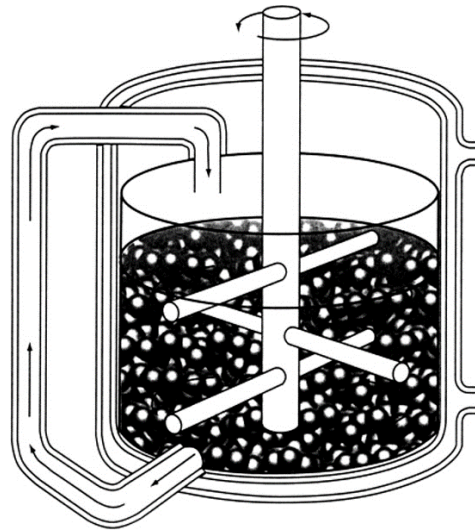
Fonte: Adaptado de (NEIKOV, 2009).

Grandes magnitudes de força centrífuga são alcançadas pelo movimento conjugado de revolução e rotação. É muito comum encontrar tal configuração em moinhos laboratoriais. No que diz respeito ao material utilizado tanto no revestimento dos vasos como nos elementos de moagem pode-se encontrar o nitreto de silício e a zircônia (NEIKOV, 2009).

### 2.6.2 Moinhos de atrito

O moinho de atrito teve seu desenvolvimento ligado à aplicações na área da indústria farmacêutica e química. Tal equipamento consiste basicamente de um barril, um eixo central com agitadores e os elementos de moagem. No barril alimenta-se o material a ser processado, enquanto que no eixo são montados (ou soldados) agitadores, que podem possuir diferentes geometrias. Conforme ilustrado pela Figura 6 os pinos soldados ao eixo central (agitadores) são responsáveis por colocar em movimento os elementos de moagem e as partículas do material/suspensão (no caso da moagem em meio líquido).

Figura 6 – Configuração de um moinho de atrito, evidenciando-se o eixo central com os pinos agitadores, o barril e os elementos de moagem.



Fonte: (BALAZ, 2008).

A redução do tamanho de partícula é obtida pela energia relacionada aos diferentes tipos de impacto atuantes no processamento. É possível classificar as diferentes condições de contato desenvolvidas no equipamento, envolvendo:

- Os próprios elementos de moagem
- Elementos de moagem e a parede do barril
- O eixo central e os elementos de moagem
- Os pinos agitadores e os elementos de moagem

O conceito do funcionamento do moinho de atrito traz uma vantagem sobre os demais tipos de moinhos. É notório que a potência do equipamento é utilizada para a movimentação do agitador, oferecendo um melhor rendimento energético, ao passo que em outros tipos de moinhos a potência é utilizada para rotacionar ou vibrar a câmara de moagem, proporcionando maiores perdas (BALAZ, 2008).

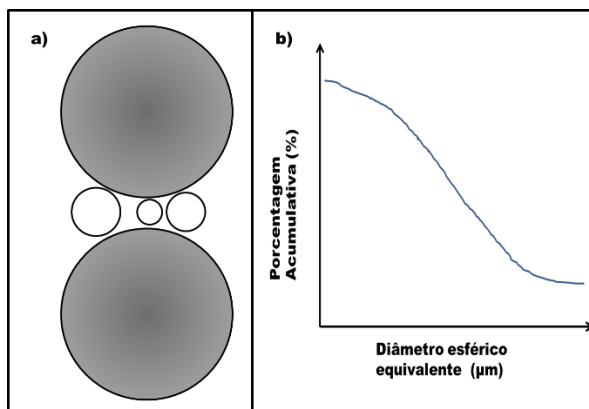
### 2.6.3 Moinho de bolas

Tal equipamento é capaz de operar em grande e pequena escala, além disso pode realizar moagem em meio úmido e meio seco. Na moagem a seco estão presentes no jarro os materiais a composição (alumina, zircônia, carbetto de silício), aditivos (lubrificantes, plastificantes) e os elementos de moagem. Destaca-se o desgaste acentuado dos elementos de moagem e também

do revestimento interno do jarro, no entanto elimina-se a etapa de secagem. Já no que se refere à moagem em meio úmido, incorpora-se uma certa proporção em líquido (30-70%) para a obtenção de uma suspensão. É possível diminuir o desgaste dos elementos através do controle da viscosidade da barbotina. (CARVALHO, 2007)

A Figura 7 demonstra a característica de moagem homogênea, bem distribuída, resultante da ação de elementos de moagem esféricos. As esferas estabelecem alguns pontos de contato entre os elementos e partículas. Além disso, a Figura 7 também esquematiza um gráfico de distribuição de tamanho de partícula acumulado com uma faixa de distribuição ampla.

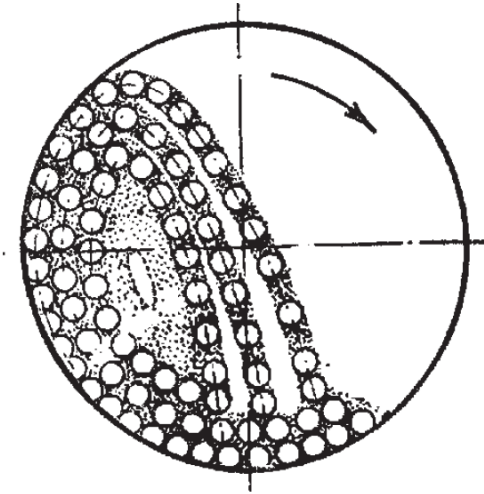
Figura 7 - a) Representação esquemática do efeito da moagem com esferas em moinhos de jarros. b) Gráfico de distribuição de tamanho de partícula acumulado de um material que tem uma faixa ampla de partículas



Fonte: (FORTULAN, 1996).

No moinho de bolas a rotação imposta ao jarro leva as partículas pequenas a movimentarem-se em velocidades diferentes, provocando fricção e impacto entre dois ou mais elementos de moagem e as partículas do material a ser processado. A Figura 10 indica o deslocamento em cascata das esferas, em meio ao material, no moinho.

Figura 8 – Movimento em cascata dos elementos de moagem esféricos no moinho de bolas rotativo cilíndrico (NEIKOV, 2009)



Fonte: (NEIKOV, 2009)

Um importante parâmetro de operação do moinho de bolas é a rotação do jarro. A rotação crítica (rpm) na qual as esferas estão em contato com a parede devido à resultante centrífuga é dada pela equação 1:

$$n = \frac{42,3}{D_m} \quad [1]$$

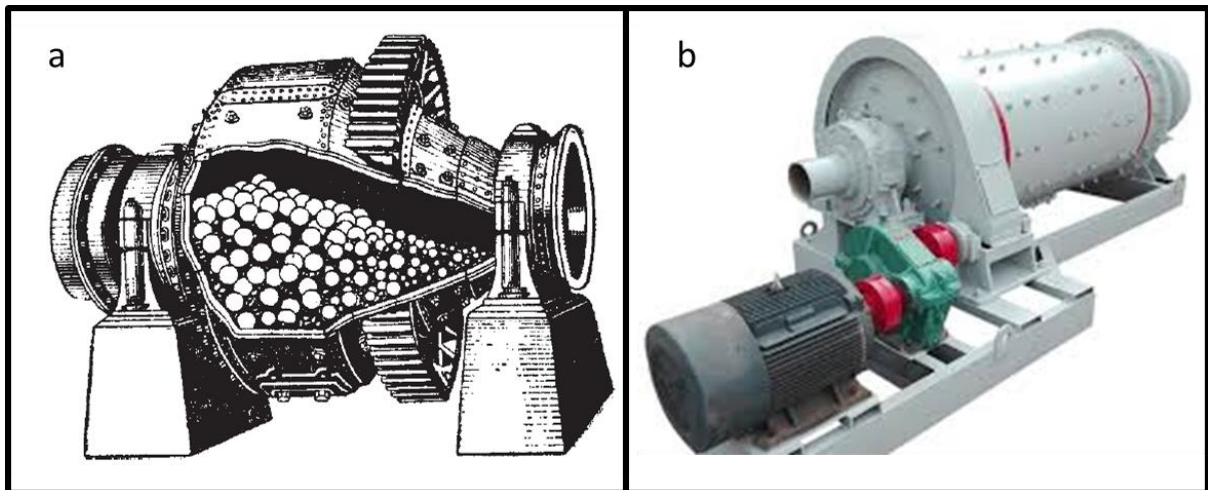
Em que  $D_m$  é o diâmetro do jarro em metros. A faixa de rotação ótima é geralmente 66-80% da velocidade crítica. Outro parâmetro importante é o diâmetro dos elementos de moagem esféricos. O diâmetro mínimo em milímetros ( $D_{min}$ ) das esferas é dado pela equação 2:

$$D_{min} = 10D_{b,máx} \sqrt{\frac{\sigma^2}{0,128E\rho D_j}} \quad [2]$$

Onde  $D_{b,max}$  é o tamanho máximo das partículas do material a ser processado ( $D_{90}$  em mm),  $\sigma$  é a resistência em compressão (MPa),  $\rho$  é a densidade do material das esferas ( $\text{Kg/m}^3$ ),  $E$  o módulo de Elasticidade e por fim  $D_j$  é o diâmetro interno do jarro. Em geral o diâmetro das esferas em relação ao diâmetro do barril são dados pelo intervalo de  $D/18 - D/24$ . O grau de preenchimento dos jarros geralmente é dado pelo intervalo de de 30-35% em volume do jarro.

No que diz respeito à razão de aspecto do jarro cilíndrico em geral mantém-se a razão de aspecto ( $L/D$ ) na faixa de 1,56-1,64. Sendo  $L$  o comprimento do barril e  $D$  o diâmetro. A Figura 9 representa um moinho de bolas cilíndrico comercial e a representação esquemática de um moinho de bolas com jarro cônico. (NEIKOV, 2009)

Figura 9 – a) Representação de um moinho de bolas de jarro cônico b) Figura de um moinho de bolas de jarro cilíndrico comercial



Fonte: (NEIKOV, 2009)

Destacam-se algumas vantagens do Moinho de bolas:

- Alta capacidade de processamento;
- Permite o processamento de diferentes materiais;
- Simplicidade operacional;
- Confiabilidade e segurança.

Tal equipamento oferece também alguns aspectos negativos, tais como:

- Equipamento pesado e de difícil manuseio;
- Pouca eficiência energética, uma parcela significativa da energia é consumida pelo desgaste dos elementos de moagem e do revestimento;
- Cerca de 2% da potência de entrada é consumida na quebra de partículas e aglomerados;
- Produz muito ruído.

#### 2.6.4 Moinho vibratório

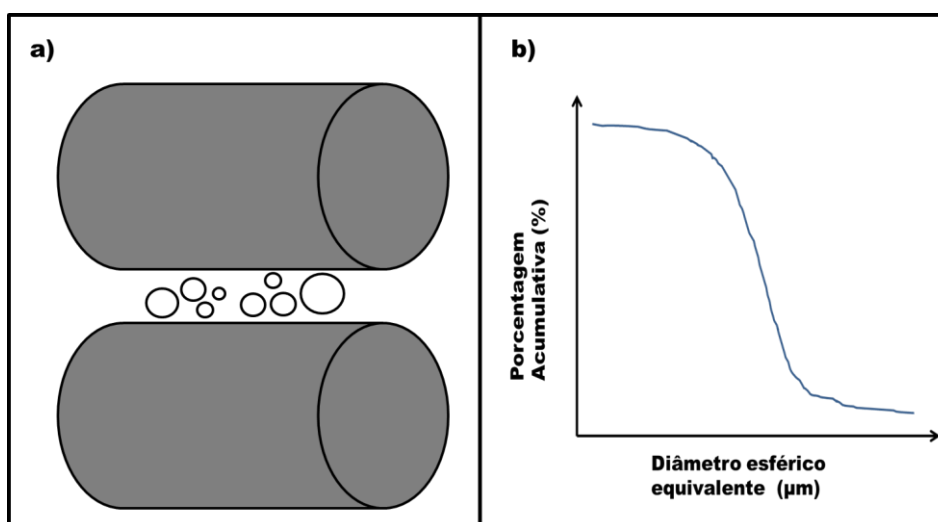
O moinho vibratório consiste fundamentalmente de três principais unidades: a cuba, a estrutura e o motor. A cuba comporta os elementos de moagem e o material a ser processado.

Convencionalmente a moagem é realizada em meio úmido, principalmente no que diz respeito à indústria de cerâmicas avançadas, no entanto é possível também a moagem à seco (CARVALHO, 2007).

Os elementos de moagem utilizados em moinhos vibratórios em geral são de formato cilíndrico, uma boa razão para isso reside na característica da geometria cilíndrica, essa que estabelece uma linha de contato entre os elementos de moagem, enquanto que as esferas apresentam pontos de contato dispersos (FORTULAN, 1996).

A Figura 10 ilustra o impacto em linha e a conseqüente fratura preferencial de partículas maiores. Em (b) representa-se esquematicamente um gráfico de distribuição de tamanho de partículas acumulada, nele é possível observar uma distribuição estreita.

Figura 10 – a) Impacto em linha dos elementos de moagem cilíndricos, fratura preferencial das partículas b) Gráfico característico de um material de distribuição de tamanho de partículas estreita, obtido após moagem no moinho vibratório (FORTULAN, 1996)



Fonte: (FORTULAN, 1996)

Em razão dos elementos de moagem cilíndricos a barbotina apresenta, em geral, uma distribuição do tamanho de partículas mais estreita quando comparado aos demais tipos de moinho. No que se refere ao volume de elementos de moagem presentes no vaso (câmara de moagem), em geral bons resultados são obtidos para geometrias tubulares, de diâmetros de aproximadamente 500mm, com preenchimentos na faixa de 60% à 80% em volume (NEIKOV, 2009).

A cuba, ou jarro, é excitada por vibrações circulares, elípticas e lineares, dependendo da configuração do moinho vibratório. Tal vibração é obtida pela adição de pesos excêntricos

posicionados na extremidade do eixo do motor. Permite-se a regulagem da amplitude e da frequência de vibração controlando alguns parâmetros, como a massa em desbalanço, a rigidez das molas e a geometria da cuba. (EBEHARD GOCK, 1999)

Já a estrutura tem como função atribuir a rigidez necessária para que a vibração gerada pela rotação da massa em desbalanço seja conduzida ao jarro e possa ser convertida em energia de moagem. A taxa de moagem obtida nos moinhos vibratórios é cerca de dez vezes superior à observada em moinhos de bolas cilíndricos (FORTULAN, 1996) (CARVALHO, 2007) (EBEHARD GOCK, 1999) (BALAZ, 2008).

A amplitude de vibração da cuba do equipamento, evidenciada pela Tabela 2, é um importante parâmetro no que se refere ao grau de movimentação dos elementos de moagem, por isso está relacionado à taxa de moagem desenvolvida pelo equipamento. A rotação aplicada às massas excêntricas são responsáveis por gerar a vibração. (EBEHARD GOCK, 1999)

Tabela 2 – Rotação e amplitude de operação para diferentes categorias de moinho

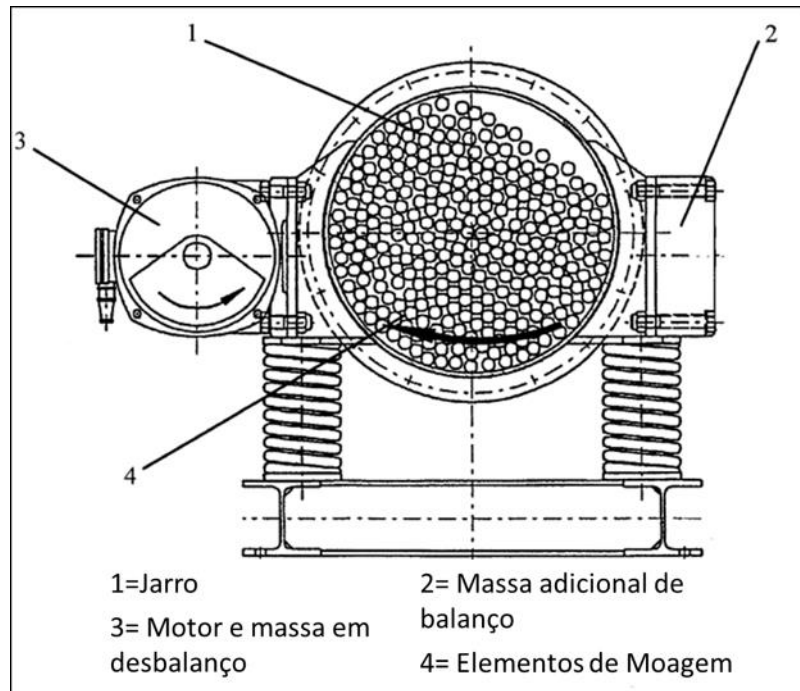
<b>Categoria</b>	<b>Amplitude [mm]</b>	<b>Rotação [rpm]</b>
Moinho vibratório Laboratorial	2-4	1500
Moinho vibratório	7-10	960-1160

Fonte :Adaptado de (EBEHARD GOCK, 1999)

#### **2.6.4.1 Moinho vibratório excêntrico**

O moinho vibratório excêntrico tem sua configuração esquematizada pela Figura 11.

Figura 11 – Representação esquemática de um moinho vibratório, do tipo excêntrico, e a indicação de alguns componentes



Fonte: Adaptado de (EBEHARD GOCK, 1999)

Tal equipamento é capaz de realizar diferentes tipos de vibrações: vibrações circulares, elípticas e lineares. O grande diferencial dessa configuração é a amplitude de vibração imposta ao jarro, sendo possível atingir a magnitude de 20mm enquanto a maioria dos moinhos vibratórios fica restrito a faixa dos 10mm. As maiores amplitudes de vibração intensificam a liberdade e a movimentação dos elementos de moagem, dessa forma aumenta-se as forças de impacto e conseqüentemente o efeito de moagem. A Figura 12 indica um modelo comercial, fabricado pela Siebtechnik.

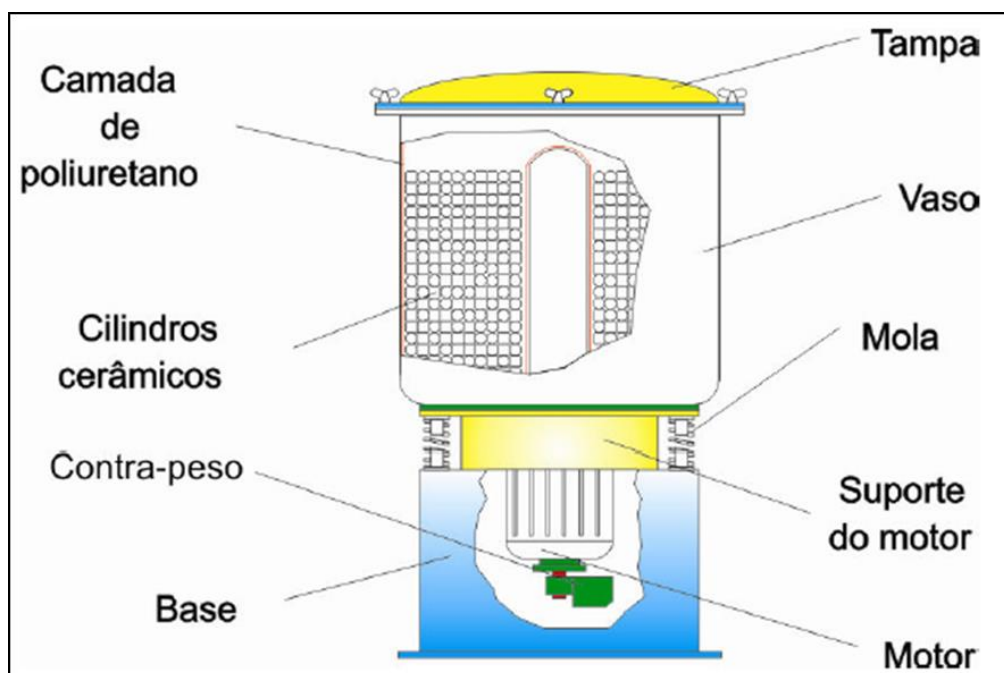
Figura 12 – Moinho vibratório, do tipo excêntrico, fabricado pela empresa Siebtechnik



### 2.6.4.2 Moinho vibratório vertical

O moinho vibratório vertical, possui uma configuração de montagem diferente do modelo excêntrico, conforme demonstrado esquematicamente pela Figura 13. Em geral esse tipo de equipamento é constituído de um vaso metálico com revestimento interno que em geral é constituído de materiais poliméricos, como o poliuretano, ou mesmo de material cerâmico, como a alumina. É possível observar um tubo central no interior do vaso na Figura 13, a presença de tal geometria justifica-se pela sua capacidade em proporcionar um movimento rotativo aos elementos de moagem. O movimento rotativo conferido aos elementos de moagem é estabelecido em relação ao eixo de simetria do moinho (Figura 13). A parte inferior da cuba está diretamente fixada ao motor vibratório para que a vibração seja conduzida aos elementos de moagem. (FORTULAN, 1996)

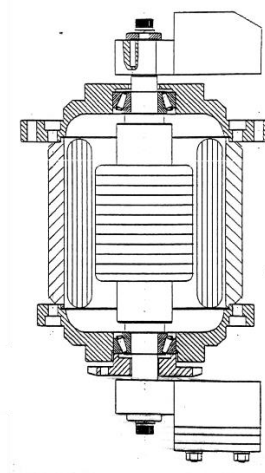
Figura 13 – Representação esquemática da configuração de montagem de um moinho vibratório do tipo concêntrico.



Fonte: (CARVALHO, 2007)

O motor elétrico é responsável por induzir o vaso à vibrar, para tal adiciona-se contrapesos às extremidades dos eixos do motor. Tal configuração é esquematizada pela Figura 14.

Figura 14 – Representação esquemática em corte da carcaça do motor e seus componentes, evidenciando-se também os contrapesos acoplados às extremidades dos eixos do motor.

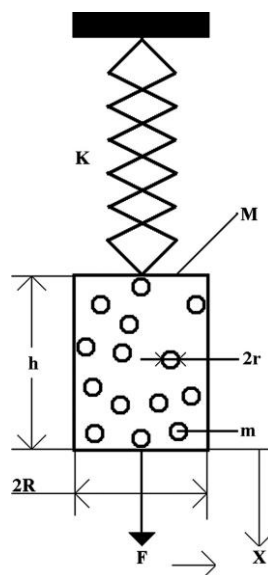


Fonte: (FORTULAN, 1996)

Um dos parâmetros operacionais mais importantes do moinho vibratório é a amplitude de vibração. O controle da amplitude pode ser feito pela adição ou remoção de massa dos contrapesos (CARVALHO, 2007). O motor deve operar em frequências próximas à frequência de ressonância do conjunto, dessa forma atinge-se magnitudes de amplitude.

A Figura 15 mostra um modelo proposto por UKAREV, 2014, no qual o vaso cilíndrico possui massa  $M$ , raio  $R$  e altura  $h$ . Tal reservatório é suspenso por uma mola de constante  $K_m$ .

Figura 15 – Modelo do moinho vibratório



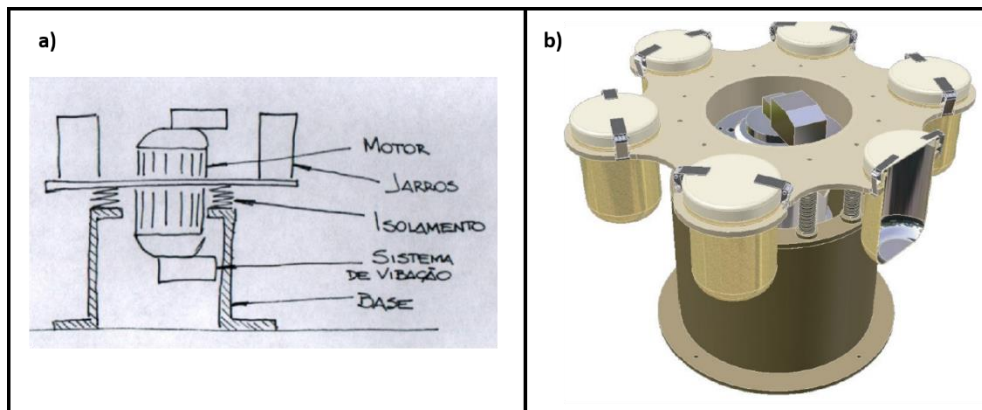
Fonte: (UKAREV, 2014)

A frequência de ressonância  $W_o$  do conjunto (desconsiderando os elementos de moagem e barbotina) é dada pela equação 3:

$$W_o = \sqrt{\frac{k_m}{M}} \quad [3]$$

Uma estimativa da frequência de operação pode então ser obtida. Pode se perceber que há uma notória relação entre a estrutura do moinho e a operação do motor. A estrutura deve apresentar uma rigidez condizente aos parâmetros operacionais do moinho. O esboço demonstrado pela Figura 16 exhibe a configuração estrutural de um moinho vibratório de escala laboratorial de múltiplos jarros.

Figura 16 – a) Esboço da configuração estrutural do moinho vibratório b) Desenho em CAD do projeto do mini moinho vibratório de múltiplos jarros (CARVALHO, 2007)



Fonte: (CARVALHO, 2007)

## 2.7 Metodologia de projeto

Aspectos psicológicos, sistemáticos e organizacionais estão diretamente envolvidos no desenvolvimento de um projeto. O ato de projetar pode ser entendido como início do ciclo de vida de um produto. As tarefas do engenheiro projetista podem ser divididas em três principais macrofases: planejamento, desenvolvimento e implementação. O escopo do presente trabalho reside na macrofase de desenvolvimento, dessa forma as etapas de projeto conceitual, preliminar e detalhado terão maior importância. (NETTO, 2017)

Na etapa do projeto conceitual busca-se elencar soluções ou princípios funcionais condizentes com os requisitos dos usuários. Pode-se dizer que na etapa em questão objetiva-se:

- Estabelecer funções e seus requisitos
- Estabelecimento de princípios para as funções
- Geração de alternativas para as principais funções
- Refinamento e aplicação de métricas para as soluções potencialmente viáveis
- Escolha das opções viáveis de projeto.

Seguido do projeto conceitual estabelece-se a fase do projeto preliminar, que é o momento no qual as soluções e princípios funcionais devem ser estruturados conforme critérios técnicos e econômicos. Prepara-se o produto para ser definitivamente descrito para fabricação. É também no projeto preliminar que são discutidos:

- Pré-dimensionamento dos componentes e conjuntos
- Elaboração de modelos numéricos para a análise das soluções
- Testes e avaliações das soluções de projeto
- Refinamento e otimização das soluções e projeto

A última etapa envolvida pelo presente trabalho será a de detalhamento, nela são definidas forma, acabamento superficial, análise de custo, processamento, fabricação e logística (NETTO, 2017) (ALESSANDRO R, 2015).

## **2.8 Vibrações**

As vibrações estão diretamente relacionadas ao caráter oscilatório do movimento dos sistemas físicos e são resultantes do efeito combinado de forças elásticas e da inércia de corpos rígidos (ou pontuais). As vibrações podem ser encontradas em diversas aplicações mecânicas e estruturais, por exemplo: máquinas, mecanismos, prédios e pontes. Em alguns desses sistemas vibrações excessivas podem gerar grandes níveis de tensão, podendo ocasionar falhas mecânicas (SHABANA, 1991). Em outros casos as vibrações são incorporadas aos princípios de funcionamento de máquinas, como no caso dos moinhos vibratórios. Deseja-se que a amplitude de vibração atuante na máquina promova a movimentação dos elementos de moagem.

Vibrações podem ser classificadas em livres e forçadas. No caso das vibrações livres não existem forças externas atuantes no sistema, já as vibrações forçadas são resultantes de uma

excitação externa. Em ambos cenários o sistema físico deve ser capaz de produzir forças restauradoras que tendem a manter o caráter oscilatório do movimento. (SHABANA, 1991)

Os sistemas físicos apresentam frequências de ressonância características. Quando um sistema está sob o efeito de sua frequência de ressonância, nota-se elevados valores de amplitude de vibração, o que pode conduzir a falha do sistema. A frequência de ressonância é função da geometria do sistema físico, da condição de vínculo, e do módulo elástico do material. Um sistema físico pode apresentar infinitas frequências de ressonância e cada uma delas apresenta um diferente modo de vibrar. (SHABANA, 1991)

## **2.9 Densidade de empacotamento de partículas**

O empacotamento de partículas é um tópico que vem despertando o interesse de pesquisa em decorrência de sua importância nos processos industriais. O preenchimento de silos e armazéns, o empacotamento de solos e o processamento de produtos farmacêuticos compõem alguns exemplos das aplicações do estudo de empacotamento de partículas (HENNA TANGRI, 2016).

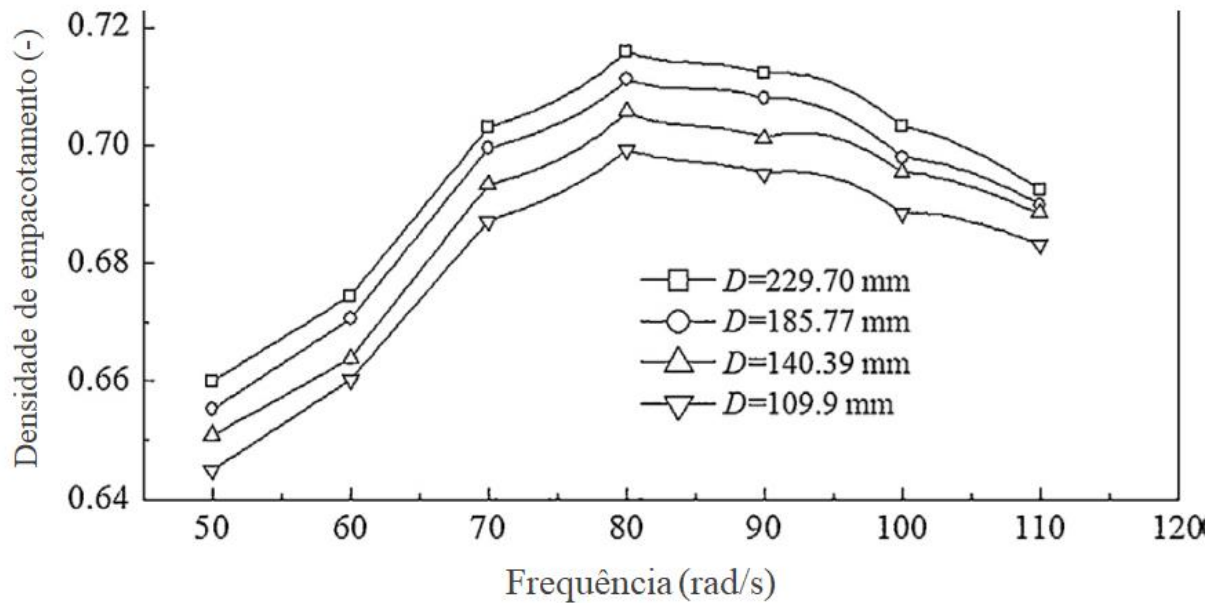
O empacotamento de partículas esféricas uniformes tem sido o tópico mais estudado dentro dessa área. O empacotamento randômico das esferas estabelece-se no intervalo de 0,59-0,60 para partículas soltas e na faixa de 0,64-0,65 para partículas empacotadas densamente. Observa-se uma influência direta entre a razão: diâmetro da partícula/ diâmetro do reservatório, com a densidade de empacotamento. Quanto maior a razão, menor a porosidade. Observou-se também uma correlação entre o coeficiente de restituição da partícula com a densidade de empacotamento (HENNA TANGRI, 2016).

Nos últimos anos, pesquisadores vêm demonstrando interesse no comportamento de partículas não esféricas. A faixa de densidade de empacotamento obtida por partículas cilíndricas fica restrita ao intervalo de 0,36-0,68. Tal intervalo de empacotamento é sensível à alguns fatores, dentre eles a vibração. Quando partículas cilíndricas são submetidas à vibração, observa-se uma tendência de alinhamento vertical com a parede do reservatório dessa forma valores de empacotamento superiores são obtidos (HENNA TANGRI, 2016).

Já, no estudo de Quian 2016 (QUAN QIAN, 2016), buscou-se avaliar a densidade de empacotamento de partículas cilíndricas considerando-se 3 diferentes parâmetros: a geometria do reservatório, a amplitude de vibração imposta ao reservatório e a razão de aspecto das partículas.

Primeiramente a geometria do reservatório manteve-se cilíndrica para todos os experimentos, buscou-se avaliar a influência de seu diâmetro em relação a densidade de empacotamento. A Figura 17 ilustra o efeito do diâmetro do reservatório, utilizando-se elementos cilíndricos equiláteros de 10mm de comprimento.

Figura 17 – Dependência da densidade de empacotamento em relação à frequência de oscilação, para diferentes medidas de diâmetro (QUAN QIAN, 2016)

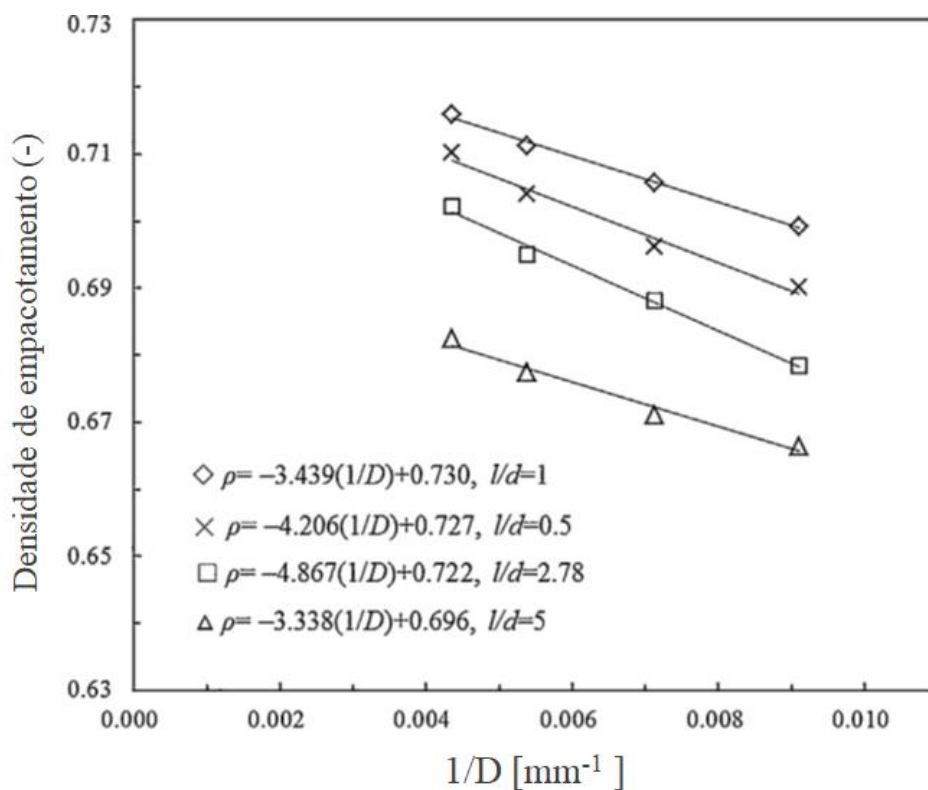


Fonte: Adaptado de (QUAN QIAN, 2016)

Pode-se perceber que independentemente da frequência de vibração, os valores de diâmetro maiores apresentaram densidades de empacotamento superiores, pois o efeito de parede é atenuado. Além disso, há um máximo de empacotamento para a frequência de 80 rad/s.

Um segundo resultado obtido a partir do estudo QUAN QIAN, 2016, foi a relação entre a razão de aspecto dos elementos cilíndricos e a densidade de empacotamento. O gráfico representado pela Figura 18 indica a relação entre os diferentes diâmetros de reservatório (em forma de fração  $1/D$ ), e a densidade de empacotamento para diferentes valores de razão de aspecto dos elementos cilíndricos.

Figura 18 – Relação entre a densidade de empacotamento e a fração  $1/D$ , para diferentes razões de aspecto dos elementos cilíndricos



Fonte: Adaptado de (QUAN QIAN, 2016)

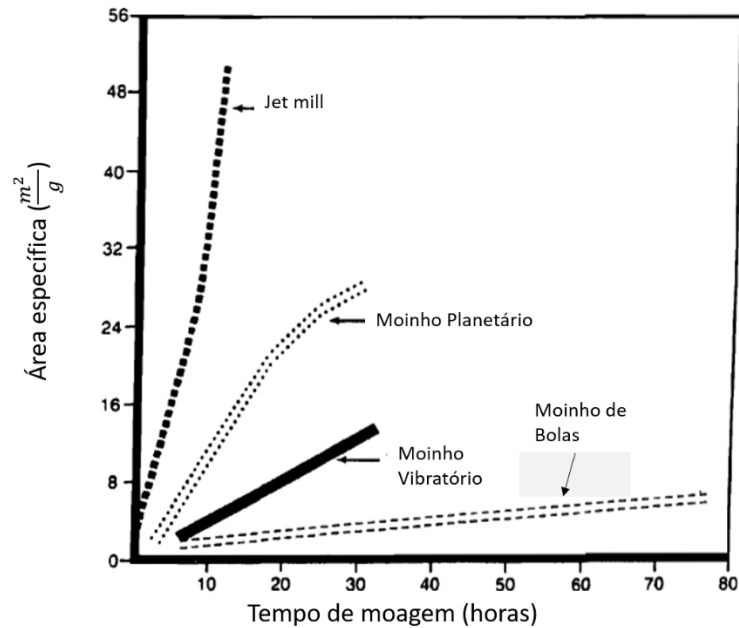
A partir das expressões oferecidas pela Figura 20, pode-se estimar a densidade de empacotamento para um reservatório de diâmetro ( $D$ ) preenchido com partículas cilíndricas de razão de aspecto  $l/d=1$ ;  $l/d=0,5$ ;  $l/d=2,78$ ;  $l/d= 5$ . Também é possível perceber que partículas cilíndricas equiláteras proporcionam uma maior densidade de empacotamento quando comparadas às partículas não equiláteras.

### 3. AVALIAÇÃO COMPARATIVA DE DESEMPENHO

#### 3.1 Taxa de Moagem

A taxa de moagem é um parâmetro importante no que se refere à rapidez de processamento. O gráfico representado pela Figura 19 demonstra o desempenho de diferentes tipos de moinhos, relacionando a área superficial específica e o tempo de moagem.

Figura 19 – Relação entre área específica e tempo de moagem para diferentes tipos de moinhos



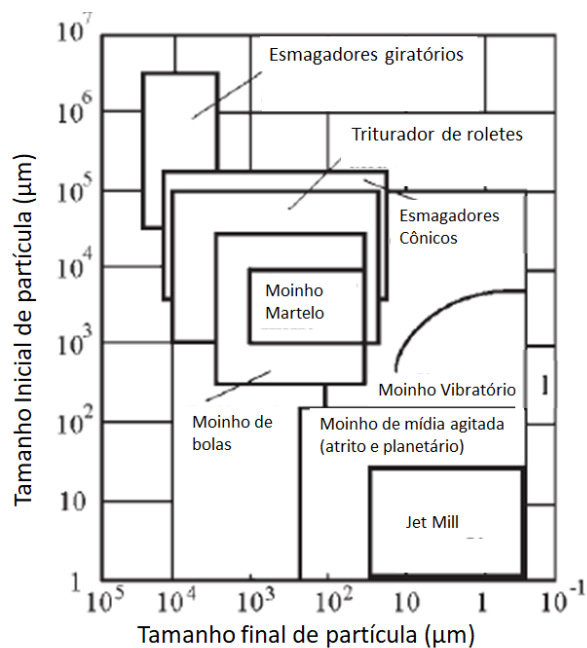
Fonte: Adaptado de (RICHERSON, 1992)

A partir do gráfico, é possível perceber o desempenho superior do moinho *jet mill*, este que é capaz de obter partículas com maior área superficial em menor tempo, dessa forma foi atribuída a maior nota para tal na tabela comparativa. De modo semelhante, aos demais tipos de moinho foram atribuídas notas proporcionais ao desempenho exibido no gráfico, enquanto que ao moinho de atrito foi considerada uma nota intermediária, de desempenho superior ao moinho de bolas, mas inferior ao planetário.

### 3.2 Granulometria

Já no que se refere a granulometria, a Figura 20 é capaz de oferecer uma base comparativa para a capacidade de moagem considerando os diferentes tipos de moinhos (NEIKOV, 2009).

Figura 20 – Relação entre tamanho de partícula inicial e tamanho de partícula final para os diferentes tipos de moinhos



Fonte: Adaptado de (NEIKOV, 2009)

De forma semelhante Wellenkamp (1999), também classificou os tipos de moinho quanto a granulometria do produto final de moagem, conforme demonstrado pela Tabela 3.

Tabela 3 – Classificação da granulometria do produto final de moagem para diferentes tipos de moinhos. Partículas finas com tamanho inferior à 100µm, partículas ultrafinas inferior à 10 µm.

<b>Tipo de moinho</b>	<b>Granulometria</b>
Moinho de bolas	Fina
Moinho planetário	Ultrafina
Moinho vibratório	Ultrafina
Moinho de atrito	Ultrafina
Jet Mill	Ultrafina

Fonte: Wellenkamp (1999)

Dada a importância do requisito de granulometria utilizou-se mais uma referência para a análise comparativa. Segundo (C. BARRY CARTER, 2013), é possível classificar o tamanho final de partículas de acordo como tipo de moinho utilizado, conforme indicado pela Tabela 4.

Tabela 4 – Classificação quantitativa da granulometria quanto aos diferentes tipos de moinhos (C. BARRY CARTER, 2013)

<b>Tipo de moinho</b>	<b>Granulometria</b>
Moinho de bolas	0,5 - 10 $\mu\text{m}$
Moinho vibratório	1 - 50 $\mu\text{m}$
Moinho de atrito	0,1 - 10 $\mu\text{m}$
Jet Mill	1 - 50 $\mu\text{m}$

Fonte: (C. BARRY CARTER, 2013)

Utilizando-se os dados das Tabela 3 e da Tabela 4 foi possível atribuir notas aos diferentes tipos de moinho. Destacando-se o moinho vibratório e o Jet Mill, ambos sendo capazes de atingir a faixa de tamanho de partículas requerida pelo projeto.

### 3.3 Capacidade de Produção

No quesito de capacidade de produção destaca-se positivamente o moinho de bolas (rotativo). Para a produção em larga escala os moinhos de bolas são empregados pois o mecanismo de funcionamento (movimento em cascata dos elementos de moagem) não é prejudicado conforme o aumento da escala de operação, sendo assim é possível encontrar máquinas capazes de processar toneladas por batelada.

Já o moinho planetário é o de pior desempenho nesse quesito, tratando-se de uma configuração de moinho apropriada para escala laboratorial. O volume de material processado por batelada é baixo em comparação ao volume da máquina.

O Moinho vibratório do tipo vertical também não apresenta um bom desempenho, dado que há uma certa limitação para o tamanho do jarro em decorrência da distância da fonte de excitação. Além disso, a fração volumétrica ocupada pelos elementos de Moagem é alta, podendo chegar aos 80% (NEIKOV, 2009).

### 3.4 Manuseabilidade

Destaca-se negativamente o moinho de bolas. Trata-se de um equipamento volumoso, pesado e pouco prático, embora seja fácil operação. A limpeza do jarro requer operações de carga e descarga dos elementos de moagem, exige-se também a limpeza individual dos elementos de moagem (tal dificuldade estende-se à todos moinhos de elementos de moagem).

Requer grandes tempos de moagem, intensificando a exposição à elevados níveis de ruído por extensos períodos de tempo (NEIKOV, 2009).

Já o moinho vibratório é menos volumoso e pesado, sendo também de simples operação. Em alguns casos, o equipamento exige uma maior robustez da estrutura de fundação em sua área de montagem para que possa operar por grandes períodos de tempo (SIDOR, 2005).

Os moinhos de atrito e planetário possuem sistemas mecânicos mais complexos, que dificultam a operabilidade e a manutenção dos dispositivos, contudo apresentaram níveis de pontuação intermediário.

Os moinhos do tipo Jet Mill também não possuem bom desempenho nesse critério. O sistema mecânico apresenta subconjuntos com peças muito específicas e de difícil substituição. Além disso, para operá-lo é necessário treinamento (SIDOR, 2005).

### **3.5 Complexidade de Fabricação**

No quesito fabricação, o moinho de bolas, atrito e o vibratório foram os de melhor pontuação em razão da simplicidade geométrica de seus subsistemas, pouca exigência de eletrônica e são construídos utilizando materiais metálicos convencionais. A pontuação do jet mill foi a mais baixa em decorrência de sua complexidade de construção e suas peças extremamente específicas. Já o moinho planetário apresentou um desempenho intermediário, a rotação em dois eixos diferentes do planetário requer maior complexidade de manufatura.

### **3.6 Consumo Energético**

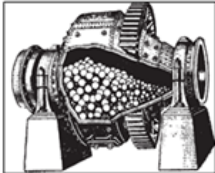
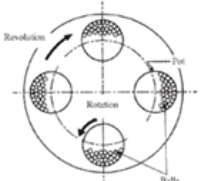
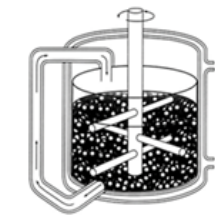
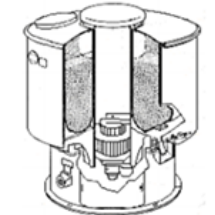
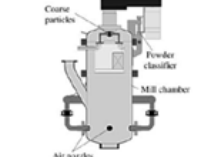
De forma geral os moinhos são máquinas de pouca eficiência energética. Os moinhos de bolas apresentam em média 2% de eficiência, ou seja apenas 2% da potência do equipamento é consumida na quebra de partículas e aglomerados (C. BARRY CARTER, 2013). Destacam-se o moinho de atrito, esse é mais eficiente pois a potência de entrada é direcionada diretamente ao eixo agitador, diferentemente dos moinhos de bolas, vibratório e planetário que requerem a movimentação de todo o vaso e outros subsistemas para gerar o efeito de moagem (BALAZ, 2008).

O processo de moagem pelo moinho Jet Mill também é pouco eficiente. A energia consumida chega a ser de 6 a 10 vezes maior do que a gasta pelo moinho vibratório (SIDOR, 2005).

### **3.7 Tabela Comparativa**

Para que fosse possível ratificar a opção pela configuração do moinho vibratório, montou-se uma tabela comparativa na qual atribuiu-se notas aos diferentes aspectos de projeto. Buscou-se estabelecer um critério de notas de zero a dez para avaliar as considerações de projeto presentes nos diferentes tipos de moinhos. Sendo a nota zero considerada impraticável e a nota dez uma solução técnica de absoluto sucesso. Conforme indica a Figura 21, são avaliados os critérios de taxa de moagem, granulometria, capacidade de produção, complexidade de fabricação/manutenção e consumo energético para os moinhos de bola, planetário, atrito, vibratório e Jet Mill.

Figura 21 – Comparação de diferentes tipos de moinhos perante diferentes critérios de projeto.

	Taxa de Moagem	Granulometria	Capacidade de Produção	Manuseabilidade	Complexidade de fabricação	Consumo Energético	Média dos Atributos
<b>Moinho de Bolas</b> 	5	6	10	7	8	5	6,83
<b>Moinho Planetário</b> 	8	7	5	6	6	6	6,33
<b>Moinho de atrito</b> 	7	8	5	6	8	8	7,00
<b>Moinho Vibratório</b> 	7	9	7	8	8	7	7,67
<b>Jet Mill</b> 	10	9	8	5	5	5	7,00

#### 4. DEFINIÇÃO DA GEOMETRIA DA CUBA

Este capítulo dedica-se à análise da cuba de um moinho vibratório vertical empregado ao processamento de barbotinas à base de zircônia. A proposta, de desenvolver um moinho

capaz de quebrar os aglomerados presentes na barbotina e promover a diminuição no tamanho das partículas cerâmicas presentes na dispersão, foi elaborada com base no contexto de produção de cerâmicas técnicas e pesquisa.

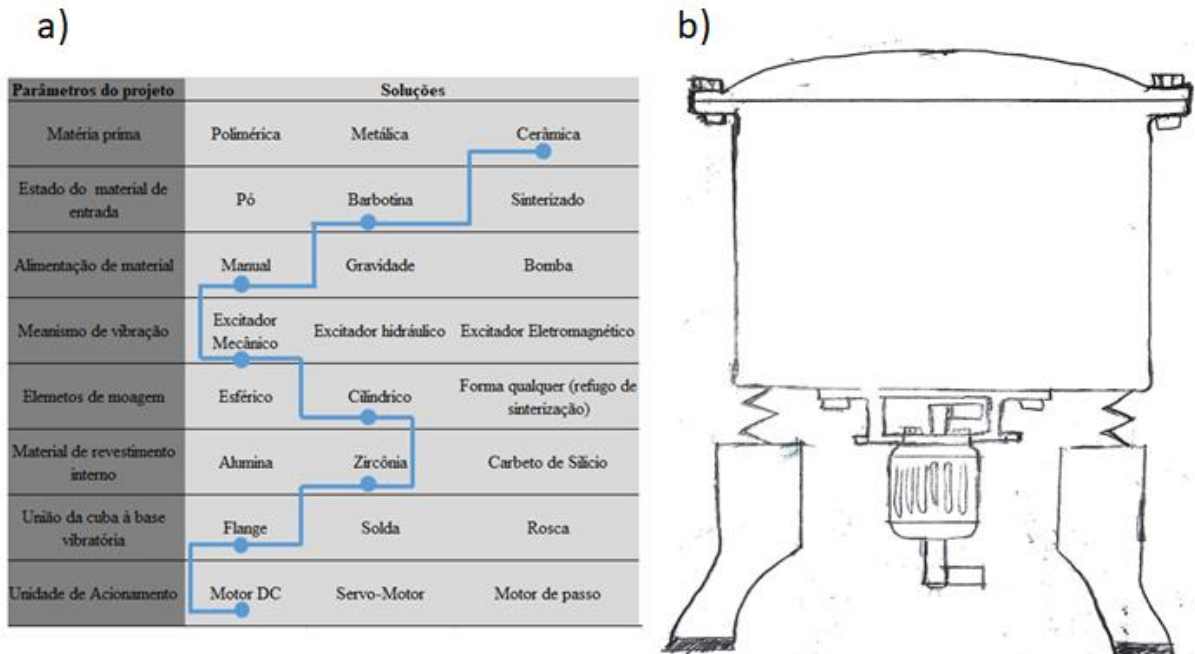
#### **4.1 Requisitos de projeto**

Para garantir que o moinho servirá aos seus propósitos, ele deve seguir aos seguintes requisitos de projeto:

- Capacidade de processamento mínima: 25 quilogramas de barbotina por batelada
- A barbotina apresenta densidade ( $\rho$ ), de  $1,7 - 2,5 \text{ g/cm}^3$
- Cerca de 50% da massa de barbotina é composta de sólidos
- Envelope de trabalho do equipamento: 600x600x1200 mm
- Ser capaz de promover a moagem de partículas de zircônia, gerando um material que depois de seco, apresente D50 abaixo de  $10 \mu\text{m}$
- Evitar que a barbotina seja contaminada pelo material da cuba (desgaste)
- Favorecer manutenção e usabilidade

O moinho vibratório vertical pode ser dividido em subsistemas, sendo eles: a cuba (ou vaso), a estrutura e a unidade de acionamento. Buscou-se dimensionar cada um dos subsistemas, de forma a garantir o cumprimento dos requisitos de projetos levantados. Dessa forma buscou-se fazer uma matriz morfológica para identificar às soluções adotadas aos parâmetros de projeto, conforme mostra a matriz é uma ferramenta de projeto que aponta possíveis soluções para os subsistemas do equipamento, facilitando a tomada de decisão.

Figura 22 – a) Matriz morfológica elaborada para o equipamento de moagem voltado para o processamento de barbotinas à base de zircônia, com círculos indicando a configuração escolhida. b) Croqui da montagem.

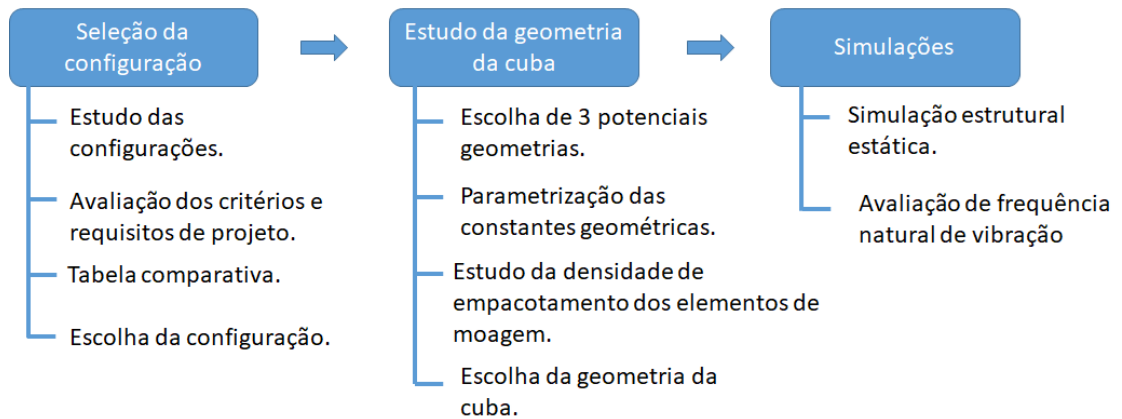


Identifica-se a união por flanges entre a cuba e o excitador mecânico. As 10 molas de compressão são distribuídas homogeneamente no perímetro do diâmetro da cuba e ligam-se a base da estrutura. O excitador mecânico conta com duas massas excêntricas montadas no eixo do motor elétrico DC. Os pés da base são revestidos por borracha, proporcionado amortecimento das vibrações. A tampa é fechada com parafusos de pressão.

## 4.2 Projeto preliminar

Para que o equipamento em desenvolvimento possa atender à seu propósito, ele deve apresentar algumas restrições iniciais. Se por um lado a liberdade do projetista é comprometida pelas restrições, por outro lado obtém-se às condições primárias que viabilizam as sucessivas definições dos subsistemas e suas interações. Dessa forma, o andamento do projeto é viabilizado, uma vez que há uma grande interdependência no que se refere ao dimensionamento dos subsistemas. No presente trabalho, procedeu-se o estudo conforme indicado pela figura.

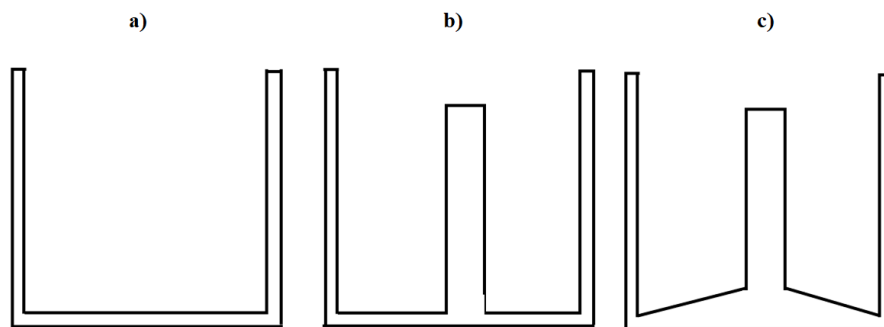
Figura 23: Fluxograma referente às etapas de análise



#### 4.2.1 Estudo da Geometria da Cuba

Para definir-se a geometria da cuba, inicialmente, estudou-se três potenciais geometrias. A figura 24 indica as três possibilidades estudadas, em forma esquemática.

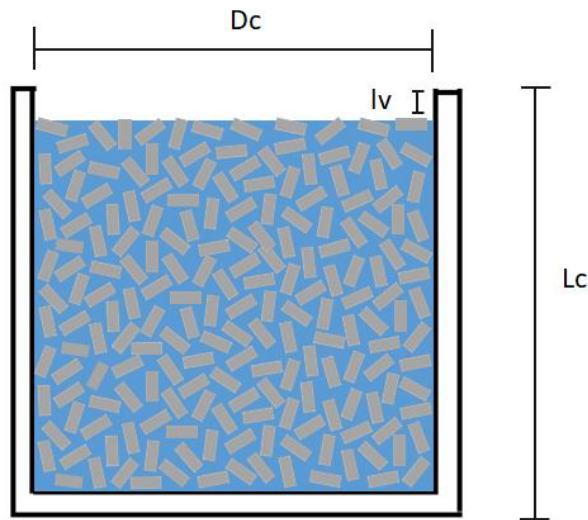
Figura 24 – a) Configuração 1: Geometria cilíndrica simples b) Configuração 2: Geometria cilíndrica com haste central c) Configuração 3: Geometria de base cônica e haste central



##### 4.2.1.1 Configuração 1

A geometria cilíndrica simples (configuração 1), indicada pela Figura 24, tem seus principais parâmetros indicados pela figura 25.

Figura 25 – Representação esquemática da configuração 1 da cuba, onde evidencia-se o preenchimento com elementos de moagem cilíndricos e os parâmetros geométricos



Os parâmetros geométricos da cuba são descritos conforme indica a Tabela 5.

Tabela 5 – Parâmetros geométricos da configuração 1 (geometria cilíndrica simples)

Parâmetro	Significado
Dc	Diâmetro da cuba
lv	Comprimento interno sem preenchimento (vazio)
Lc	Comprimento da cuba

Para o dimensionamento da cuba, o requisito de capacidade de produção de 25 Kg de barbotina por batelada é o mais importante. O equacionamento do volume interno da cuba pode ser descrito pela seguinte equação 4.

$$V_{total} = V_{barbotina} + V_{elementos\ de\ moagem} + V_{vazio} \quad [4]$$

Sabe-se que o volume dos elementos de moagem é uma fração do volume útil da cuba, ou seja ele é diretamente proporcional à densidade de empacotamento das partículas cilíndricas. Definiu-se “e”, como tal parâmetro. Consequentemente é possível equacionar da seguinte forma, equação 5:

$$V_{total} = V_{barbotina} + V_{\acute{u}til} \cdot e + V_{vazio} \quad [5]$$

O volume útil da geometria cilíndrica simples (configuração 1), é dado pela diferença do volume total da cuba e do volume vazio (tal parcela é equacionada para evitar derramamentos, eliminando o efeito indesejado do preenchimento total do recipiente, buscou-se manter o comprimento vazio ( $l_v$ ) em aproximadamente 15 mm. Consequentemente, obtém-se a expressão dada pela equação 6:

$$V_{total} = V_{barbotina} + (V_{total} - V_{vazio}) \cdot e + V_{vazio} \quad [6]$$

Rearranjando os termos da equação 6, obtém-se equação 7:

$$V_{total} = \frac{V_{barbotina}}{(1 - e)} + V_{vazio} \quad [7]$$

Equacionando-se os volumes, a partir dos parâmetros geométricos dados pela Tabela 5, desenvolve-se a seguinte equação 8:

$$\frac{\pi \cdot D_c^2 \cdot L_c}{4} = \frac{M_b}{\rho \cdot (1 - e)} + \frac{\pi \cdot D_c^2 \cdot l_v}{4} \quad [8]$$

Onde  $M_b$  é a massa de barbotina adicionada à cuba, e  $\rho$  a densidade. Para obter-se uma expressão direta para o cálculo do diâmetro da cuba, adicionou-se algumas constantes à expressão, conforme sugerido na Tabela 6.

Tabela 6 – Constantes e parâmetros de entrada para o cálculo do diâmetro da cuba

<b>Parâmetro</b>	<b>Significado</b>
K	$K=L_c/D_c$ (Razão de aspecto da cuba)
y	$Y=l_v/L_c$ (Razão de comprimento vazio)
$M_b$	Massa de barbotina (parâmetro de entrada)
$\rho$	Densidade da barbotina (parâmetro de entrada)

Utilizando as constantes descritas pela Tabela 6, e rearranjando os termos, obtém-se a seguinte equação 9 para o diâmetro da cuba ( $D_c$ ):

$$D_c = \left( \frac{4 \cdot M_b}{\pi \cdot K \cdot \rho \cdot (1 - e) \cdot (1 - y)} \right)^{\frac{1}{3}} \quad [9]$$

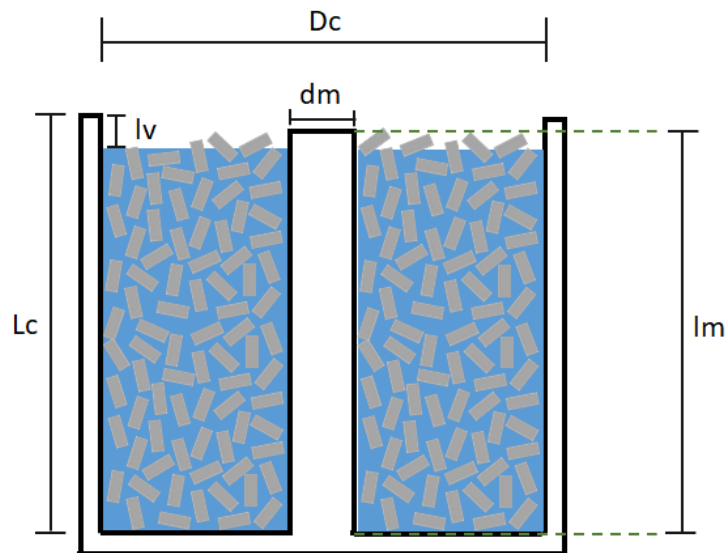
#### 4.2.1.2 Configuração 2

De forma análoga à configuração 1, também fez-se o equacionamento relativo ao volume da cuba, porém considerou-se também o volume da haste cilíndrica central, conforme indicado pela equação 10:

$$V_{total} = V_{barbotina} + V_{haste\ central} + V_{elementos\ de\ moagem} + V_{vazio} \quad [10]$$

Para um melhor entendimento dos parâmetros geométricos envolvidos tem-se a Figura 26:

Figura 26 – Representação esquemática da configuração 2 (preenchido com elementos cilíndricos e barbotina) e os parâmetros geométricos envolvidos



Na Tabela 7, tem-se a descrição completa dos parâmetros geométricos, os dados de entrada que compõe a configuração 2 e algumas constantes geométricas (geometria cilíndrica com haste central).

Tabela 7 – Parâmetros geométricos referentes à configuração 2 (geometria cilíndrica com haste central)

Parâmetro	Significado
K	$K=L_c/D_c$ (Razão de aspecto da cuba)
y	$Y=l_v/L_c$ (Razão de comprimento vazio)
a	$a= d_m/D_c$ (Razão de diâmetros)
b	$b= l_m/L_c$ (Razão de comprimento haste)
$M_b$	Massa de barbotina (parâmetro de entrada)
$\rho$	Densidade da barbotina (parâmetro de entrada)

A equação 11 utiliza os parâmetros descritos na Tabela 7 para descrever o diâmetro da cuba ( $D_c$ ) da configuração 2.

$$D_c = \left( \frac{4 \cdot M_b}{\pi \cdot K \cdot \rho \cdot (1 - e) \cdot (1 - a^2 \cdot b - y)} \right)^{\frac{1}{3}} \quad [11]$$

#### 4.2.1.3 Configuração 3

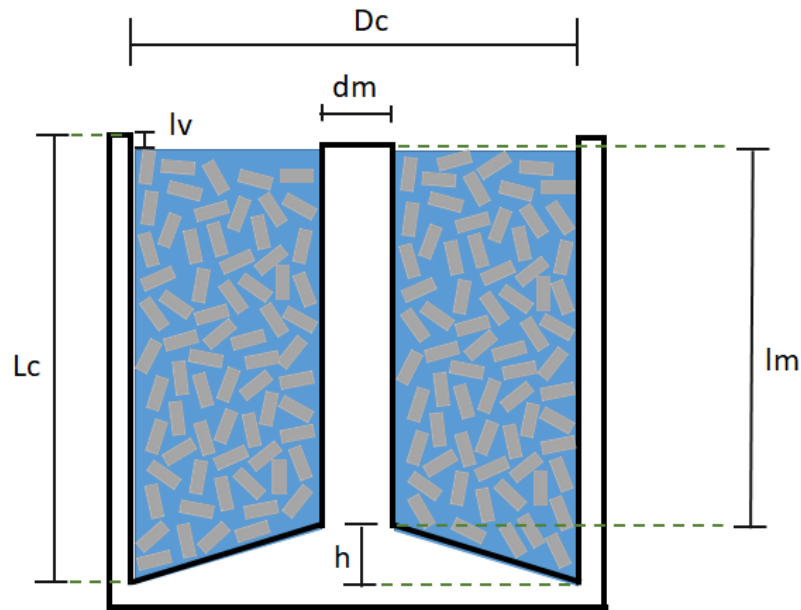
Por fim estudou-se uma terceira configuração, que além da haste central cilíndrica, também apresenta sua base no formato de um tronco de cone, dessa forma a barbotina pode escoar para a lateral da cuba, facilitando sua captação. O equacionamento geral do volume interno pode ser descrito pela equação 12:

$$V_{total} = V_{barbotina} + V_{haste\ central} + V_{elementos\ de\ moagem} + V_{vazio} + V_{tronco\ de\ cone} \quad [12]$$

A

Figura 27 demonstra esquematicamente a configuração 3 da cuba e indica alguns parâmetros utilizados no equacionamento do volume.

Figura 27 – Configuração 3 da cuba e seus principais parâmetros geométricos



De maneira análoga às seções anteriores, utilizou-se algumas constantes geométricas e parâmetros de entrada que são descritos na Tabela 8.

Tabela 8 – Constante geométricas e dados de entrada da configuração 3 da geometria da cuba.

Parâmetro	Significado
K	$K=L_c/D_c$ (Razão de aspecto da cuba)
y	$Y=l_v/L_c$ (Razão de comprimento vazio)
x	$x=h/L_c$ (Razão de altura e comprimento)
a	$a= d_m/D_c$ (Razão de diâmetros)
b	$b= l_m/L_c$ (Razão de comprimento haste)
$M_b$	Massa de barbotina (parâmetro de entrada)
$\rho$	Densidade da barbotina (parâmetro de entrada)
$x+y+b \leq 1$	Condicional de validade da geometria

Da seguinte maneira, o diâmetro da cuba ( $D_c$ ), pode ser obtido a partir da equação 13.

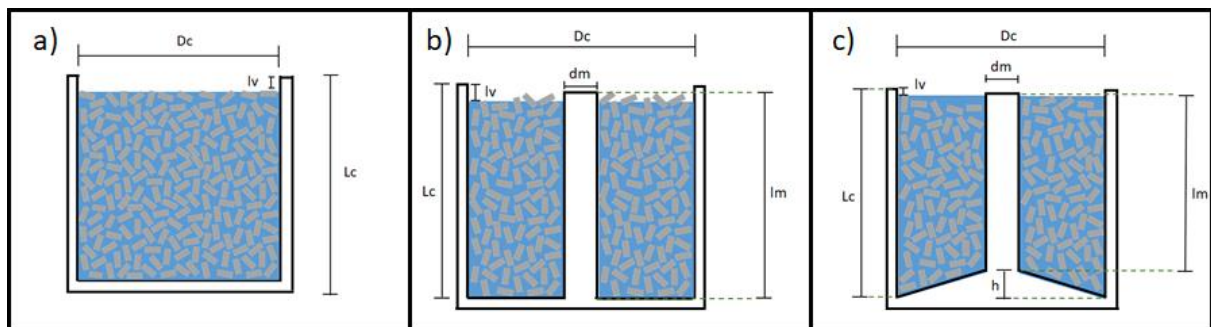
$$D_c = \left( \frac{4 \cdot M_b}{\pi \cdot K \cdot \rho \cdot (1 - e) \cdot \left(1 - a^2 \cdot b - \frac{x}{3} - \frac{a \cdot x}{3} - \frac{a^2 x}{3} - y\right)} \right)^{\frac{1}{3}} \quad [13]$$

#### 4.2.2 Comparativo entre as configurações da cuba

Considerando as mesmas condições de processamento, como: massa de barbotina em processamento, capacidade produtiva e geometria de elemento de moagem, buscou-se realizar um estudo comparativo entre as diferentes configurações, conforme mostrado pela figura 28 diante dos seguintes parâmetros de comparação:

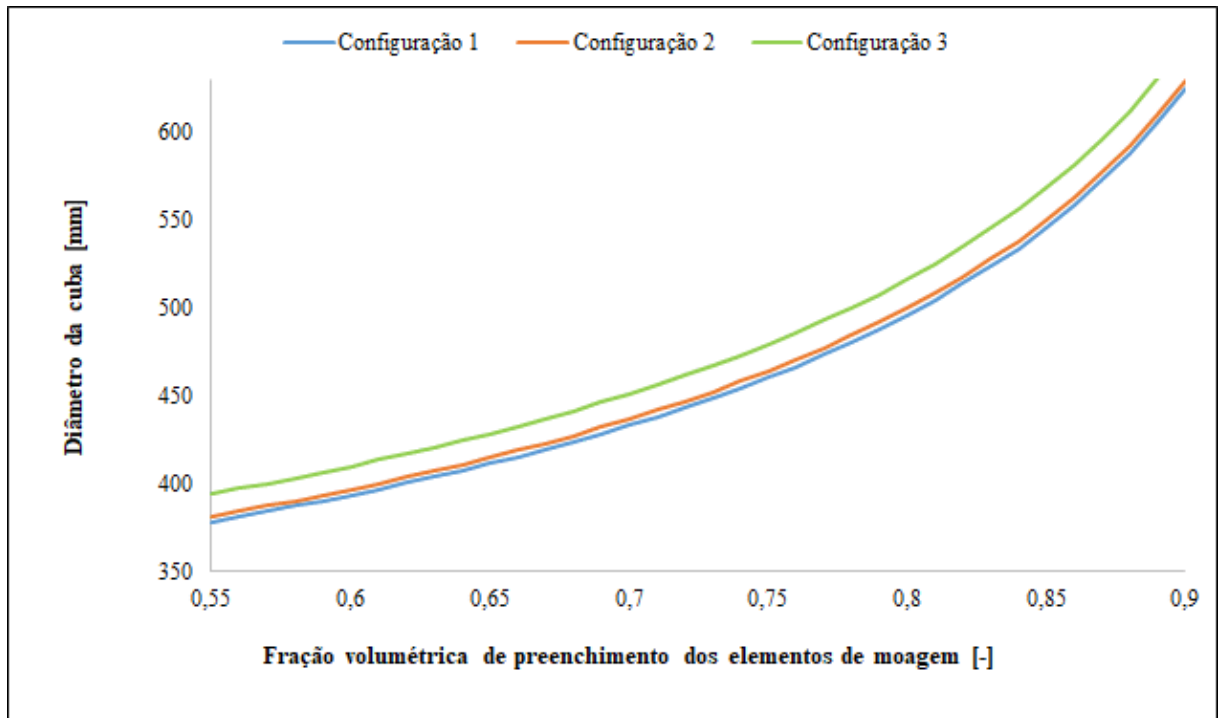
- Restrições de tamanho do equipamento
- Capacidade de moagem
- Captação da barbotina processada
- Contaminação por desgaste da cuba

Figura 28 – Comparativo entre as diferentes Configurações das cubas



Conforme indica a definição do problema, considera-se que a barbotina à base de zircônia possui densidade mínima de  $1,7 \text{ g/cm}^3$ , deseja-se processar, no mínimo, 25kg de material por batelada, utilizando-se elementos de moagem cilíndricos equiláteros. Adotou-se também a razão de aspecto da cuba ( $K=0,8$ ) constante para as diferentes configurações, obteve-se o seguinte gráfico comparativo, indicado pela Figura 29.

Figura 29 – Comparativo entre configurações, relacionando-se o diâmetro da cuba e a densidade de empacotamento dos elementos cilíndricos.



Fica evidente que a configuração 1 requer diâmetros menores para acomodar a mesma quantidade de barbotina, quando comparada às configurações 2 e 3. Entretanto o incremento de diâmetro observado, entre as diferentes configurações, para um mesmo valor de densidade de empacotamento, é pouco significativo para a capacidade mínima de produção alvo do equipamento (25Kg/batelada). A área de montagem requerida pelo equipamento, que é um parâmetro de projeto favorável aos moinhos vibratórios verticais, é pouco afetada pela escolha da configuração.

É necessário frisar que a densidade de empacotamento dos elementos de moagem cilíndricos varia entre as diferentes configurações da cuba. A configuração 1 apresenta um efeito de parede menos pronunciado, ou seja, existem menos elementos de moagem em contato com a área superficial interna da cuba. Esse fato permite que a configuração 1 disponha de uma maior densidade de empacotamento dos elementos de moagem, isso quer dizer que há mais contato da barbotina com os elementos de moagem na configuração 1. Nesse caso é possível prever a densidade de empacotamento, conforme previsto por (QUAN QIAN, 2016), quando forem utilizados elementos cilíndricos equiláteros de 30 mm de diâmetro, pela equação 14:

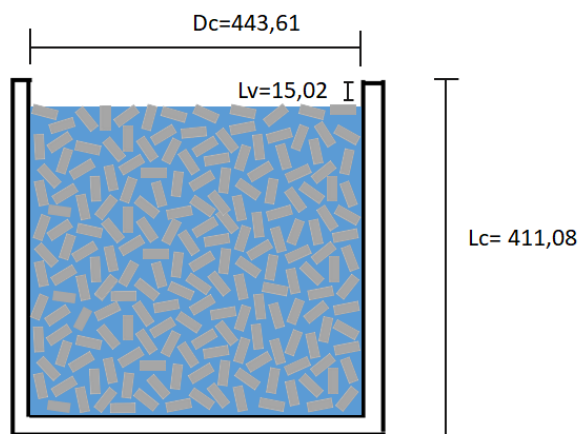
$$e = -3,49 \cdot \frac{1}{D_c} + 0,73 \quad [14]$$

Iterando-se alguns valores das constantes geométricas na equação 14, obteve-se uma boa convergência entre os resultados da equação 14 e a equação 15. Ao adotar-se a densidade de empacotamento  $e=0,72$ ; o valor da razão de aspecto  $K=0,8$  e a razão de comprimento vazio  $y=0,0425$ , para a equação 15.

$$D_c = \left( \frac{4 \cdot M_b}{\pi \cdot K \cdot \rho \cdot (1 - e) \cdot (1 - y)} \right)^{\frac{1}{3}} \quad [15]$$

Obteve-se o valor do diâmetro da cuba ( $D_c$ ) e as demais cotas, conforme observado pela figura 30.

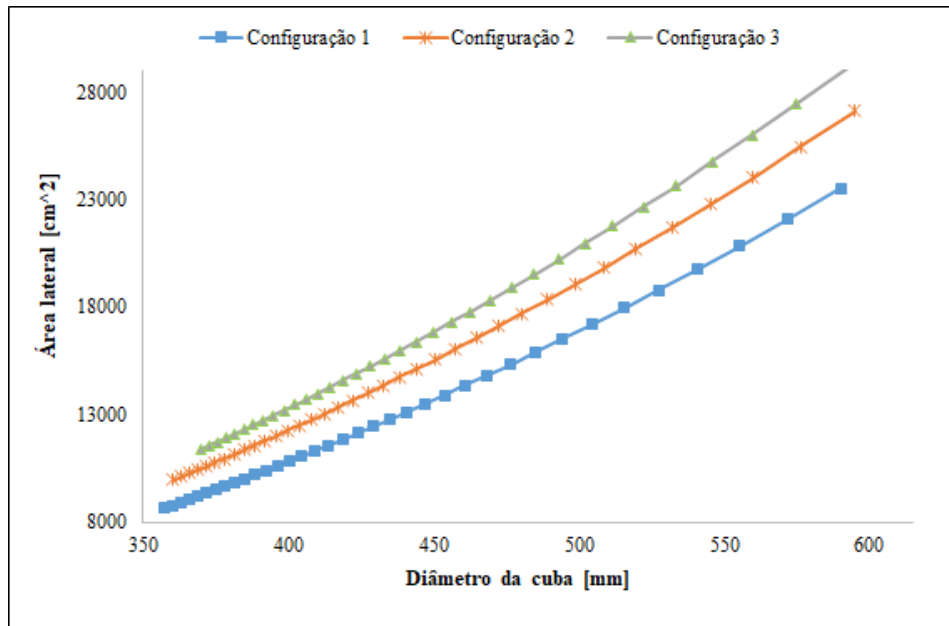
Figura 30 – Cotas da configuração 1



Ao utilizar o  $D_c=443,61$  e aplicar a equação 13, também chega-se ao resultado de  $e=0,722$ , demonstrando a convergência entre as equações.

As configurações 2 e 3 são geometricamente mais complexas, dessa forma apresentam maiores valores de área superficial interna, conforme indicado pelo gráfico da Figura 32.

Figura 31 – Correlação entre área superficial interna da cuba e diâmetro da cuba para diferentes medidas de diâmetro.



Notoriamente, as configurações 2 e 3 apresentam valores superiores de área superficial interna da cuba, mantendo os mesmos valores para as constantes geométricas  $K$ ,  $y$ ,  $a$  e  $b$ ; adotando-se  $x=0,45$  para configuração 3. Tal dado sugere que o efeito de parede, conferido aos elementos de moagem, é superior, o que tende a prejudicar a densidade de empacotamento. Ao superestimar-se a densidade de empacotamento nas configurações 2 e 3, percebe-se que a quantidade de barbotina presente na cuba é maior do que a prevista pelo cálculo, sendo necessário um diâmetro da cuba ( $D_c$ ) menor. Tal equívoco, ao atribuir um valor superestimado à densidade de empacotamento ( $e$ ), não traz grandes prejuízos ao dimensionamento do diâmetro da cuba ( $D_c$ ), uma vez que o efeito multiplicador do erro associado à densidade de empacotamento é pouco significativo. A equação a seguir expressa tal relação do efeito multiplicador do erro relativo à densidade de empacotamento, para as três configurações em estudo. Considerando-se que um valor  $D_0$  de diâmetro para uma cuba de formato próximo ao da cilíndrica simples (configuração 1), é calculado a partir de um valor de densidade de empacotamento ( $e$ ); é cometido um erro. Na realidade a densidade de empacotamento real ( $e_1$ ) é diferente da estimada pela equação 14, sendo assim há um erro envolvido. A relação entre o empacotamento real e o atribuído pela equação 14 pode ser descrita pela equação 16:

$$e = e_1 \cdot (1 + w) \quad [16]$$

Sendo  $w$  a porcentagem de superestimação da densidade de empacotamento. Pode-se calcular a variação percentual do diâmetro calculado a partir de  $(e)$  e o diâmetro real  $D_1$  corrigido por  $e_1$ , da seguinte forma, como indicado na equação 17:

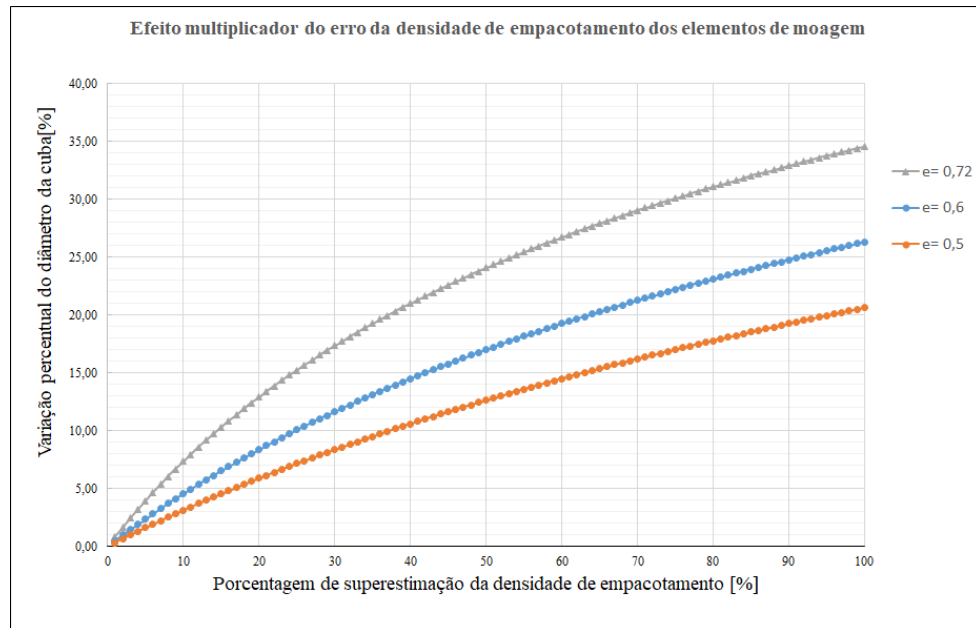
$$\frac{D_0 - D_1}{D_0} = \frac{\left(\frac{\alpha}{(1-e)}\right)^{\frac{1}{3}} - \left(\frac{\alpha}{(1-e_1)}\right)^{\frac{1}{3}}}{\left(\frac{\alpha}{(1-e)}\right)^{\frac{1}{3}}} \quad [17]$$

Sendo  $\alpha$  uma constante de proporcionalidade, simplificada a partir da equação 13. Simplificando-se, é possível chegar a seguinte expressão:

$$VD = 1 - \frac{(1-e)^{\frac{1}{3}}}{(1-(e \cdot (1-w)))^{\frac{1}{3}}} \quad [18]$$

Sendo  $VD$  a variação percentual no diâmetro da cuba associada ao erro de superestimação da densidade de empacotamento. Enquanto que  $(w)$  indica a porcentagem de superestimação da densidade de empacotamento. Para um melhor entendimento plotou-se o gráfico representado pela figura 32.

Figura 32 – Correlação de porcentagem de superestimação da densidade de empacotamento e a variação percentual de superestimação do diâmetro da cuba (Dc). Para e=0,72; e=0,6; e=0,5



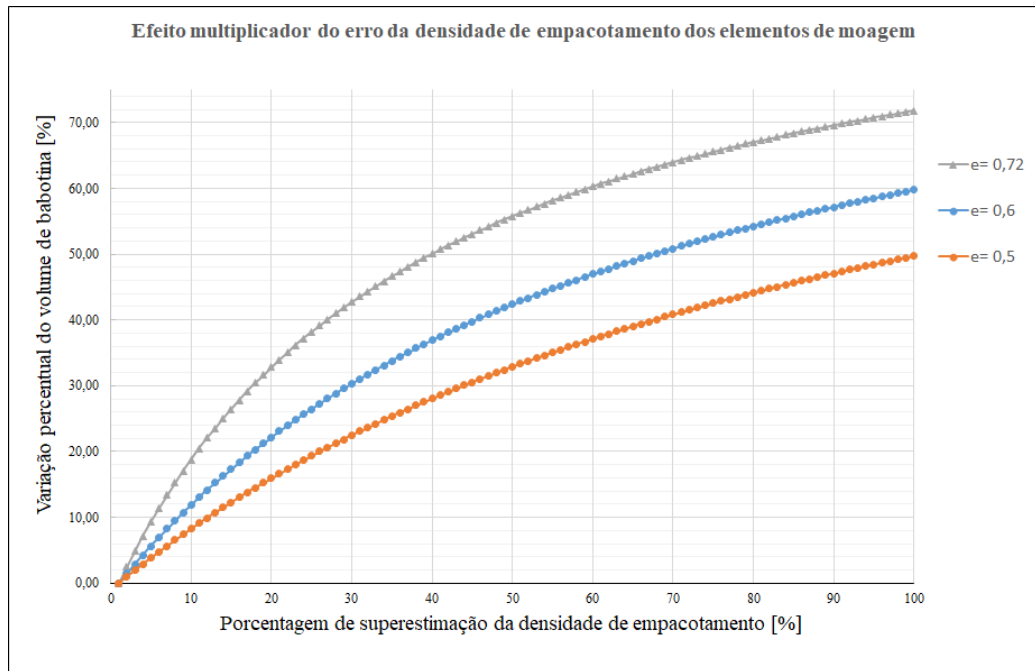
Pode-se exemplificar numericamente, tomando-se a densidade de empacotamento e=0,72, para a configuração número 3. Assume-se que foi-se superestimado a densidade de empacotamento em 20%, assim o erro relacionado ao diâmetro da cuba (Dc) é de 12,92%, ou seja ele poderia ser 12,92% menor. Tal erro não traz grandes problemas ao dimensionamento do equipamento, uma vez que a consequência de tal equívoco é a quantidade superior de barbotina que será processada em volume (e massa).

De forma análoga também calculou-se o efeito multiplicativo do erro associado à densidade de empacotamento, em relação ao volume de barbotina produzido. A equação 19:

$$VV = 1 - \frac{(1 - e)}{(1 - (e \cdot (1 - w)))} \quad [19]$$

Sendo VV a variação percentual do volume de barbotina e w, novamente a porcentagem de superestimação da densidade de empacotamento associada aos elementos cilíndricos. A Figura 33 demonstra graficamente tal dependência.

Figura 33 – Correlação de porcentagem de superestimação da densidade de empacotamento e a variação de volume de barbotina em pontos percentuais. Para  $e=0,72$ ;  $e=0,6$ ;  $e=0,5$



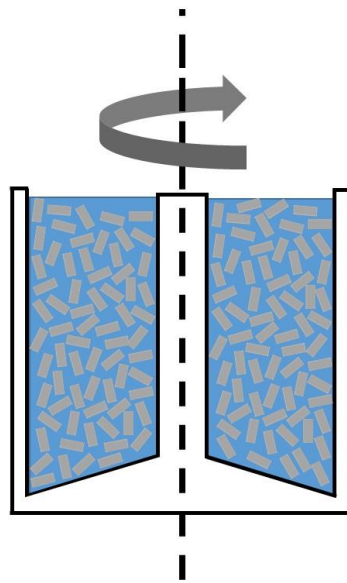
A correlação em termos de volume de barbotina apresenta maior sensibilidade ao erro associado a densidade de empacotamento, conforme mostra o gráfico indicado pela Figura 33. Exemplificando-se numericamente, ao adotar-se a densidade de empacotamento  $e=0,72$ , considerando a configuração 3 da cuba, e assumindo-se um erro de 20% (valor de densidade de empacotamento superestimado em 20%), observa-se uma variação de 33,96% de volume de barbotina. Ou seja, na cuba haverá 33,96% a mais de volume (e massa) de barbotina. Não há grandes prejuízos ao dimensionamento da máquina, uma vez que o será produzido uma quantidade superior aos 25 Kg que seriam esperados. Em termos de critério de resistência, também não há problemas, uma vez que o volume extra de barbotina é considerado como volume de elementos de moagem de zircônia. Os elementos de moagem de zircônia apresentam densidade de  $5,4 \text{ g/cm}^3$ , enquanto que a barbotina apresenta no máximo  $2,5 \text{ g/cm}^3$ .

De forma geral, pode-se concluir que nenhuma das três configurações limita o equipamento em termos de área de montagem, ou prejudica a operação do equipamento em termos de indeterminação da densidade de empacotamento dos elementos de moagem cilíndricos.

Já a capacidade de moagem do moinho vibratório vertical está diretamente ligada à mobilidade dos elementos de moagem. Os elementos de moagem são responsáveis por induzir forças compressivas às partículas dispersas na barbotina, eles também impõem taxas de cisalhamento à barbotina, proporcionam impacto entre elemento/elemento ou

elemento/partículas, atuando para promover a diminuição do tamanho das partículas que estão sendo processadas. Por conseguinte, a geometria da cuba deve permitir que os elementos de moagem cumpram seu papel. As configurações 2 e 3 apresentam uma haste cilíndrica central, tal artefato age beneficemente no que diz respeito a mobilidade dos elementos de moagem. Conforme a figura demonstra, a haste central cilíndrica induz, por meio de sua amplitude de vibração, uma velocidade aos elementos de moagem em relação ao eixo de simetria pontilhado.

Figura 34 – Velocidade de movimentação dos elementos de moagem em relação ao eixo de simetria da cuba.



Como o equipamento em questão possui capacidade de produção razoavelmente grande (mínimo de 25Kg/batelada), faz-se necessário a presença de tal haste central. Para moinhos em escala laboratorial, a configuração 1 poderia ser utilizada, uma vez que o pequeno volume interno permitiria a completa movimentação dos elementos de moagem. Mas para o presente trabalho, a configuração demonstra-se inadequada. Simulações em softwares de DEM (Discrete Element Method) poderiam, trazer uma base comparativa quantitativa, mostrando o comportamento dos elementos de moagem cilíndricos frente à amplitude de vibração imposta as diferentes configurações de cuba, entretanto tal análise está fora do escopo do presente trabalho.

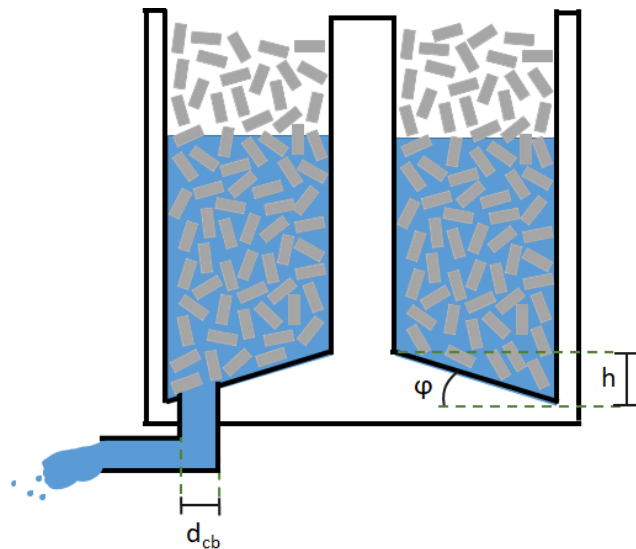
No que diz respeito ao comparativo entre a configuração 2 e a configuração 3, deve-se atentar-se ao caimento cônico disponível na configuração 3. A altura (h), conforme indica a

Figura 27, do tronco de cone, proporciona uma inclinação ( $\varphi$ ) à base da cuba. O ângulo  $\varphi$  é dado pela equação 20:

$$\varphi = \text{Arctg}\left(\frac{2 \cdot h}{D_c}\right) \quad [20]$$

O efeito benéfico de tal inclinação está diretamente relacionado à capacidade de concentrar a barbotina próxima ao ponto de coleta de material, principalmente quando a cuba está sendo esvaziada. O ponto de coleta é o furo pelo qual ocorre a captação da barbotina após o processamento. A figura indica a altura ( $h$ ), a inclinação ( $\varphi$ ) e o diâmetro de captação de barbotina  $d_{cb}$ .

Figura 35 – Representação esquemática da base inclinada e da captação de barbotina pelo furo ( $d_{cb}$ )



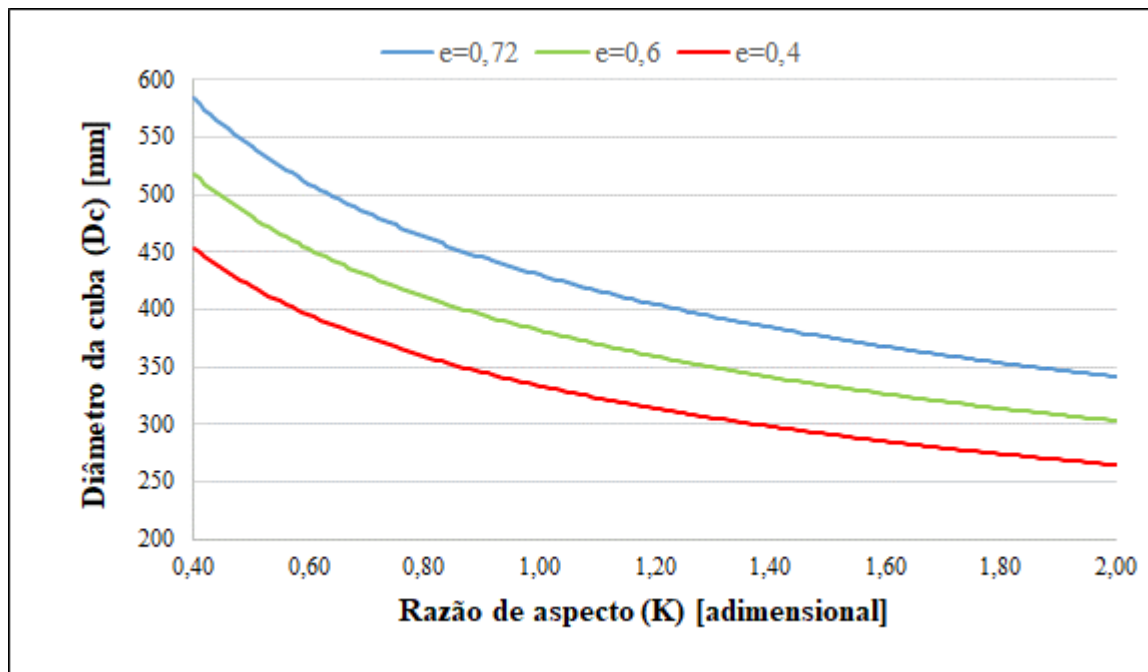
Tomando-se como referência moinhos vibratórios comerciais pode-se estimar o valor de  $d_{cb}$ . Em geral, utiliza-se a razão  $d_{cb}/D_c$  para o intervalo de 0,08-0,012. A vazão volumétrica de um líquido submetido apenas à ação da gravidade, através de um orifício, pode ser estimada pela equação 21:

$$\dot{R} = C_d \cdot A_{cp} \sqrt{2 \cdot g \cdot L_c} \quad [21]$$

Onde,  $\dot{R}$  é a vazão volumétrica ( $m^3/s$ ),  $C_d$  é uma constante referente à geometria do orifício por onde o líquido escoar,  $A_{cp}$  é área por onde escoar o líquido ( $m^2$ ),  $g$  é a aceleração da gravidade ( $9,81 m/s^2$ ) e  $L_c$  o comprimento da cuba. Percebe-se então que a vazão é diretamente proporcional à área de abertura, portanto é também proporcional ao quadrado do diâmetro.

Foi concluído então que a configuração 3 é a mais adequada para o projeto. Uma vez que definiu-se a configuração 3, pode-se otimizar o valor das constantes geométricas ( $K$ ,  $x$ ,  $y$ ,  $a$ ,  $b$ ) para obter-se uma área de montagem do equipamento reduzida e uma área lateral interna minimizada, de forma a atenuar o efeito de parede na densidade de empacotamento. Para isso, plotou-se o gráfico representado pela Figura 36, para avaliar-se a razão de aspecto da cuba.

Figura 36 – Relação entre o diâmetro da cuba ( $D_c$ ) e a razão de aspecto ( $K$ ), para diferentes valores de densidade de empacotamento ( $e$ ).



Mantendo as demais constantes geométricas fixas, foi possível optar por um valor de razão de aspecto ( $K$ ), sob o comparativo de diferentes valores de densidades de empacotamento ( $e$ ). O valor de  $K=0,8$  mostrou-se interessante para o valor adotado em projeto de  $e=0,72$ ; de forma que a área de montagem requerida não seja muito grande, mas tenha-se um diâmetro grande para aumentar-se a densidade de empacotamento. Razões de aspecto grandes, tendem a afastar os elementos de moagem da fonte excitação, logo pode-se prejudicar a capacidade de moagem do equipamento.

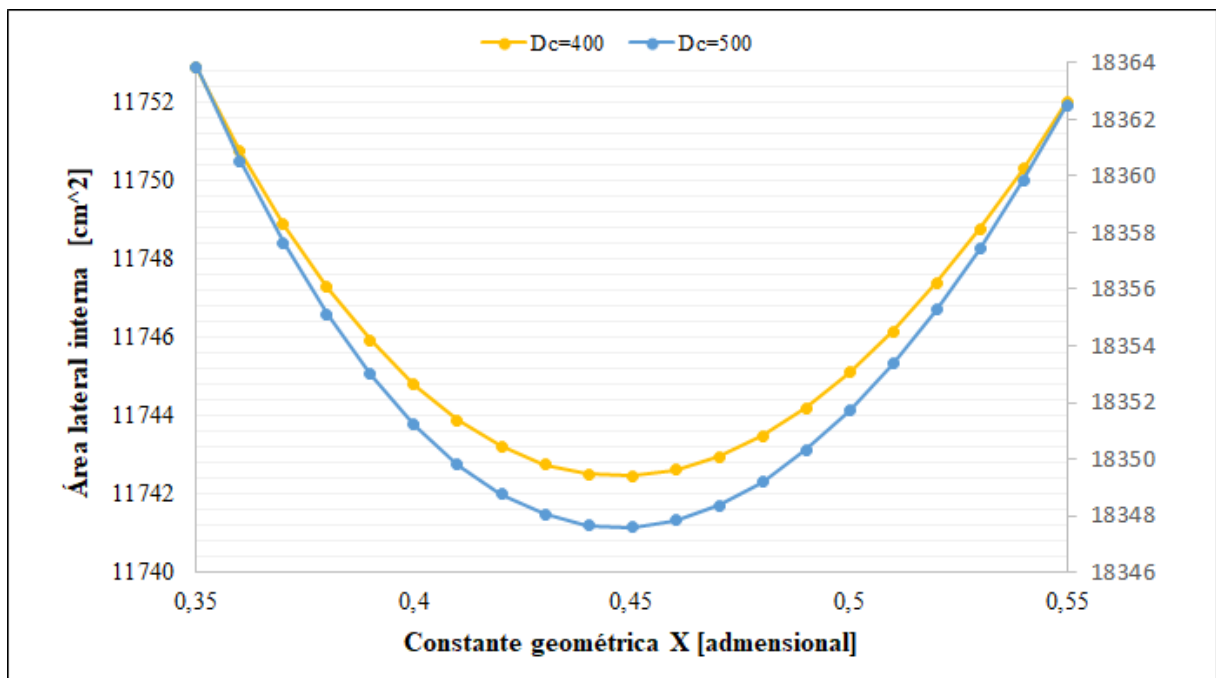
A razão de diâmetro da haste pelo diâmetro da cuba, denominada (a), foi mantida como  $a=0,2$ . Tal valor foi adotado com referência em modelos comerciais de moinhos vibratórios verticais. Manteve-se 'a' fixo para otimizar os demais parâmetros e realizando iterações

Já no que se refere às constantes geométricas x e b, foi possível encontrar um valor que minimiza a área lateral interna da cuba. Deseja-se que a haste central cilíndrica mantenha estenda-se até 96% da altura, ou seja:

$$x + b = 0,96 \quad [22]$$

Dessa forma, a haste cilíndrica central e o corpo cônico, em conjunto, mantêm-se em contato com os elementos de moagem em 96 % da extensão do comprimento da cuba, permitindo que o efeito indução de velocidade em relação ao eixo da haste, conforme mostra a Figura 34. O gráfico da Figura 37, mostra que para  $x=0,45$  minimiza-se a área lateral da cuba, independentemente do valor do diâmetro.

Figura 37 – Relação da área lateral interna da cuba com a constante geométrica x, para diferentes valores de diâmetro. O valor da série D=500, corresponde-se ao eixo secundário, à direita.



Ao minimizar a área lateral, minimiza-se também o número de elementos de moagem em contato com a superfície interna da cuba, por conseguinte atenua-se o efeito de parede que

prejudica a densidade de empacotamento dos elementos de moagem. Opta-se então por  $x=0,45$  e  $b=0,51$ .

Por fim, precisa-se definir o valor de  $y$ , que é a constante geométrica que se refere ao comprimento vazio. O comprimento vazio é considerado para evitar derramamentos no momento da alimentação de barbotina à cuba e desperdícios. Sabe-se que o critério de validade da geometria, mostrado na Tabela 8, deve-se fazer por valer a equação 23:

$$x + b + y \leq 1 \quad [23]$$

Adotando-se  $y=0,39$ , respeita-se a condição dada pela equação acima, obtendo-se um valor de  $l_v=14,98$ . Tal valor é tido como suficiente para seus propósitos. Conclui-se então a atribuição das constantes e define-se a geometria, conforme indicado pela tabela.

Tabela 9 – Constantes geométricas adotadas para a a configuração número 3.

Constantes geométricas	Valor [Adimensional]	Significado
K	0,8	$K=L_c/D_c$ (Razão de aspecto da cuba)
y	0,039	$Y=l_v/L_c$ (Razão de comprimento vazio)
x	0,45	$x=h/L_c$ (Razão de altura e comprimento)
a	0,2	$a= d_m/D_c$ (Razão de diâmetros)
b	0,51	$b= l_m/L_c$ (Razão de comprimento haste)

Dessa forma foi possível definir os parâmetros geométricos internos da cuba, conforme indicado pela tabela.

Tabela 10 – Parâmetros geométricos internos da cuba

Parâmetros geométricos	Valor [mm]	Significado
$D_c$	480,26	Diâmetro da cuba
$L_c$	384,21	Comprimento da cuba
$d_m$	96,05	Diâmetro da haste cilíndrica central
$l_m$	195,94	Comprimento da haste cilíndrica central
$h$	172,89	Altura do tronco de cone da base
$l_v$	14,98	Comprimento vazio

Para evite a contaminação decorrente da abrasividade da barbotina e dos elementos, é necessário revestir a superfície interna da cuba. Como tal equipamento destina-se a produção de barbotinas cerâmicas, o revestimento mais adequado seria de composição cerâmica igual à barbotina. Ora a barbotina é constituída principalmente de alumian, o revestimento aplicado

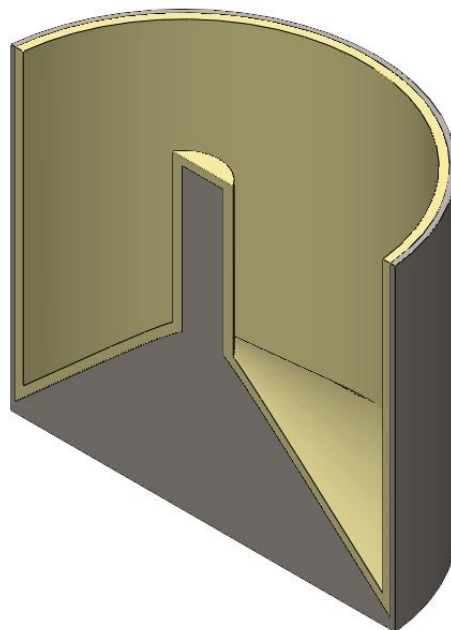
também deve ser feito em alumina. Uma vez que a parede do revestimento comece a desgastar-se e liberar partículas ao meio líquido não haveria problemas de contaminação dado que as partículas liberadas também seriam do mesmo material. A figura 38, ilustra a cuba de um moinho com revestimento cerâmico.

Figura 38 – Revestimento cerâmico de um moinho de bolas.



Dessa forma adotou-se tijolos de zircônia com 10 mm de espessura para revestir o interior do moinho. A Figura 39 demonstra o desenho em CAD do revestimento cerâmico e da cuba feita em aço 4340 normalizado.

Figura 39 – Representação da vista isométrica em corte, evidencia-se o revestimento cerâmico aplicado à cuba metálica



A Tabela 10 indica as medidas referentes ao revestimento cerâmico aplicado à cuba metálica. Já na tabela 11, tem-se as medidas referentes à cuba metálica, propriamente dita.

Tabela 11 – Cotas referentes à parte metálica da cuba

<b>Parâmetros geométricos</b>	<b>Valor [mm]</b>
Dc	512,26
Lc	406,66
dm	76,05
lm	190,39
h	190,89

#### 4.2.3 Verificação de resistência da cuba

Uma vez que a geometria do revestimento e da cuba tenha sido completamente definido pode-se verificar qual a espessura necessária a cuba necessita para suportar os carregamentos, referentes:

- Ao peso dos elementos de moagem
- Ao peso da barbotina em processamento
- Ao peso do revestimento
- Ao próprio peso decorrente da ação da gravidade

Para possibilitar a verificação de resistência, realiza-se uma simulação estrutural estática do equipamento. Mas antes, deve-se então estimar-se o volume de elementos de moagem presentes na cuba. Optou-se por elementos cilíndricos equiláteros de 30mm de diâmetro para o preenchimento da cuba. O equacionamento do volume de elementos é dado pela equação 24:

$$V_{elementos} = (V_{total} - V_{haste\ central} - V_{Tronco\ de\ cone} - V_{vazio}) * e \quad [24]$$

Substituindo-se os parâmetros geométricos descritos na Tabela 11 e adotando  $e=0,72$ , obtém-se um valor de volume de elementos presentes na cuba,  $V_{elementos}=122607393,31 \text{ mm}^3$ . O valor superestimado da densidade de empacotamento, garante um bom fator de segurança com relação às possíveis variações no volume de elementos. A composição dos elementos de moagem também é de zircônia, para evitar-se os problemas de contaminação. Deste modo pode-se estimar a massa de elementos de moagem presentes, adotando-se a densidade da zircônia como  $\rho= 5,4 \text{ g/cm}^3$ , calcula-se então que a massa de elementos presente é,  $M_e=662,08 \text{ Kg}$ . A tabela 12 sumariza tais dados.

Tabela 12 – Parâmetros de carregamento referente à massa dos elementos de moagem

<b>Parâmetro</b>	<b>Valor</b>
Volume de elementos presente na cuba	122607393,31 mm <sup>3</sup>
Volume de um elemento de moagem	21205,75 mm <sup>3</sup>
Número total de elementos presentes na cuba	5783 elementos
Densidade da zircônia sinterizada	5,4 g/cm <sup>3</sup>
Massa de elementos presente na cuba	662,08 Kg
Força peso exercida na base	6495,01 N

No que se refere à massa de barbotina, pode-se equacionar de modo análogo ao feito para os elementos de moagem. A equação 25, abaixo descreve o volume de barbotina presente na cuba.

$$V_{Barbotinas} = (V_{total} - V_{haste\ central} - V_{Tronco\ de\ cone} - V_{Vazio}) * (1 - e) \quad [25]$$

Da mesma forma, utilizando-se os parâmetros geométricos descritos Tabela 11 e adotando  $e=0,72$ ; calculou-se o  $V_B= 14705882,35\text{mm}^3$ . O dimensionamento da cuba foi realizado considerando-se a densidade de  $1,7\text{g/cm}^3$ , porém será considerado a densidade de  $2,5\text{g/cm}^3$  para que se superestimar o carregamento e garantir a resistência. Por conseguinte, obteve-se a massa de barbotina,  $M_B= 36,76\text{ Kg}$ . Tem-se a Tabela 13 resumindo os dados do carregamento relativo à massa de barbotina presente na cuba.

Tabela 13 – Parâmetros de carregamento referente à massa de barbotina

<b>Parâmetro</b>	<b>Valor</b>
Volume de barbotina presente na cuba	122607393,31 mm <sup>3</sup>
Densidade da barbotina de zircônia	2,5 g/cm <sup>3</sup>
Massa de barbotina presente na cuba	36,76 Kg
Força peso exercida na base	360,66 N

O revestimento cerâmico também atua de forma a solicitar a cuba. A representação utilizada para o revestimento, Figura 39, evidencia-o como uma geometria de casca contínua, embora na realidade o revestimento seja feito a partir de tijolos de zircônia. É comum encontrar tijolos no formato hexagonal e retangular, sendo esses unidos e/ou colados pela aplicação de resinas poliméricas. Estimou-se a massa do revestimento, adotado no presente trabalho, através

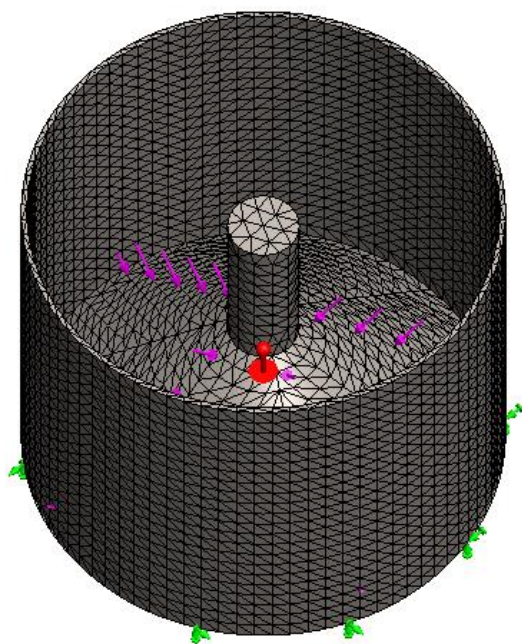
do software Solidworks, que indicou uma massa de  $M_r=29,27$  Kg. A Tabela 14 indica as forças externa atuantes na cuba metálica e a somatória total.

Tabela 14 – Forças externas atuantes na cuba

<b>Força</b>	<b>Valor</b>
Peso elementos de moagem	6495,01 N
Peso barbotina	360,66 N
Peso revestimento	287,14 N
<b>Somatória total</b>	<b>7142,81 N</b>

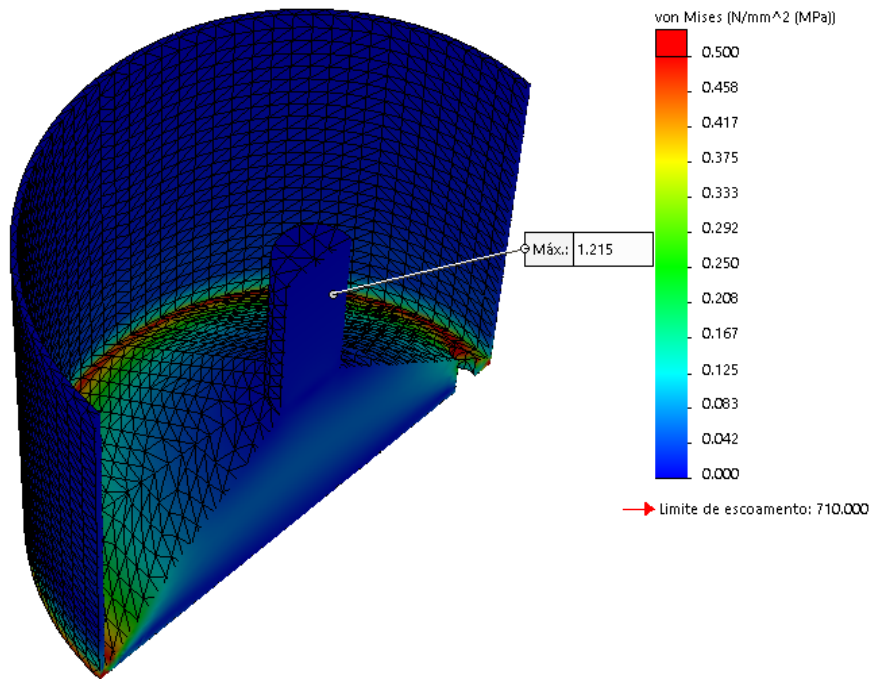
A massa da cuba metálica também pode ser estimada utilizando o software, que disponibilizou o de  $M_c=174,49$  Kg. O próprio peso pode ser simulado atribuindo-se a gravidade ao sistema. A figura 40 indica a geração da malha na cuba, os pontos de engaste (em verde), a ação da gravidade e as forças externas indicadas em roxo.

Figura 40 – Geração da malha do modelo, condições de engaste e carregamentos.



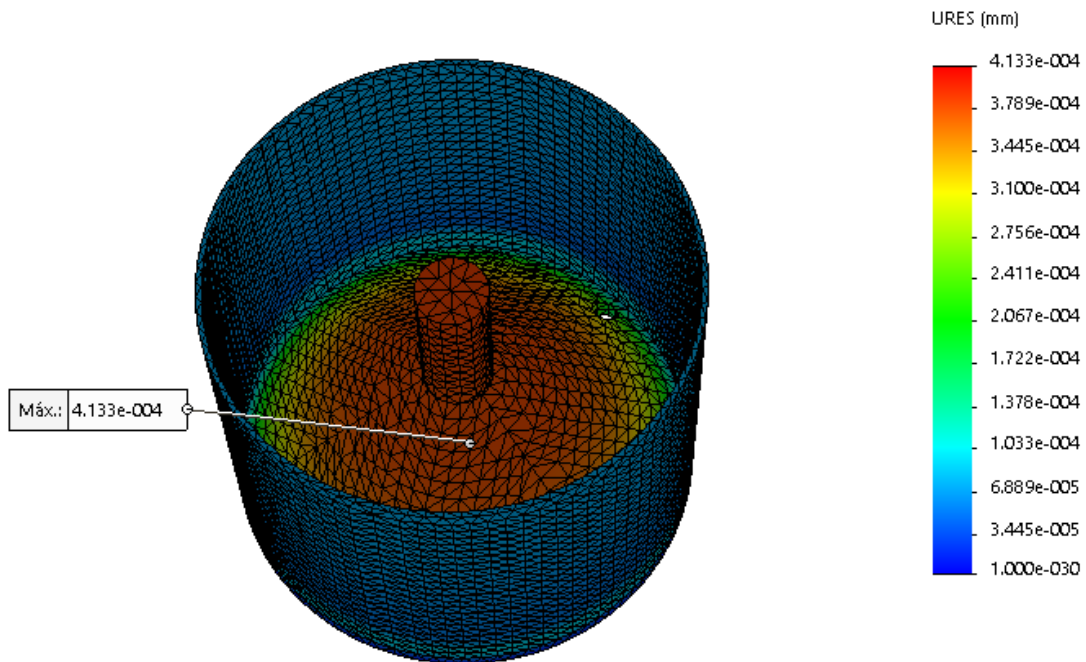
Ao se executar tal análise verifica-se que a espessura de 6mm é suficiente para tal aplicação, como demonstra a Figura 41, as tensões de Von-Mises apresentaram-se, seguramente, no regime elástico e distantes da tensão de ruptura.

Figura 41 – Análise estrutural estática. Tensão de Von-Mises



A base inteira da cuba possui uma espessura muito grande, dessa forma as tensões desenvolvidas são muito pequenas, praticamente insignificantes e termos de limite de escoamento e ruptura. Observou-se um máximo de 1,215MPa na lateral da cuba, onde a espessura é menor, conforme indicado na Figura 41. Entretanto o limite de escoamento é de 710 MPa para o aço 4340 normalizado. Observa-se também o efeito concentrador de tensão do furo de captação e barbotina. Já na Figura 42 é possível visualizar o deslocamento do tronco de cone, na base da cuba.

Figura 42 – Simulação estática estrutural da cuba. Campo de deslocamentos.



Utilizando-se os mesmos carregamentos e condições de engaste, observa-se que o deslocamento máximo dá-se no corpo cônico e apresenta valor de  $4,13 \cdot 10^{-4}$  mm. Ou seja, a geometria da cuba é preservada.

#### 4.2.4 Análise Modal

Uma vez que definiu-se a geometria da cuba e validou-se sua resistência mecânica, pôde-se abordar, então, o próximo subsistema. O projeto da estrutura do equipamento é altamente dependente do dimensional da cuba e das características do acionamento.

No que se refere ao dimensionamento das molas presentes na estrutura, primeiramente deve-se calcular a massa do sistema, para que se possa estimar a rigidez necessária das molas. A tabela fornece a força peso do sistema da cuba e de seus componentes individuais.

Tabela 15 – Força peso referente ao sistema da cuba e de seus componentes individuais

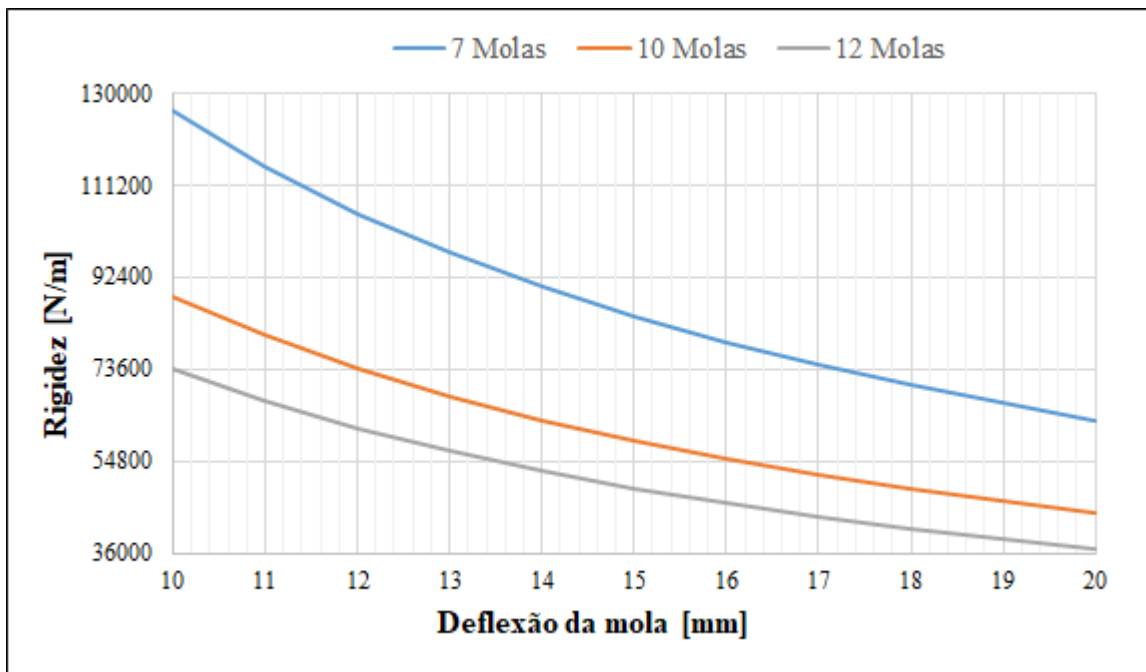
Força	Valor
Peso elementos de moagem	6495,01 N
Peso barbotina	360,66 N
Peso revestimento	287,14 N
Peso Cuba metálica	1711,75 N
<b>Somatória total (Sistema)</b>	<b>8854,56 N</b>

Considerando-se que a estrutura apresentará de 7-12 molas, e inicialmente estima-se que a deflexão da mola é de 10-20mm, pode-se então estimar a rigidez das molas pela equação:

$$K_m = \frac{\text{Força peso do sistema da cuba}}{\text{Deformação esperada} \times \text{Número de molas}} \quad [26]$$

Em tal cenário a rigidez máxima da mola calculada é  $K_m = 126493,67 \text{ N/m}$ , em quanto que a rigidez mínima foi de  $K_m = 36893,98 \text{ N/m}$ . Plotou-se o gráfico representado pela Figura 43, para uma melhor visualização da variação da constante elástica, conforme o número de molas e a deformação.

Figura 43 – Rigidez da mola versus Deformação, para 7, 10 e 12 molas.



Os parâmetros geométricos de uma mola helicoidal de compressão são descritos pela Tabela 16, sendo o módulo de cisalhamento (G) referente ao material da mola.

Tabela 16 - Parâmetros da mola helicoidal de compressão e símbolos

Parâmetros da mola	Símbolo
Diâmetro do arame	$d_{am}$
Diâmetro médio	$D_{mm}$
Número de espiras ativas	$N_a$
Módulo de cisalhamento	$G$

Utilizando tais parâmetros é possível obter a constante elástica da mola ( $K_m$ ), de acordo com a seguinte equação 27 sugerida (NORTON, 2004):

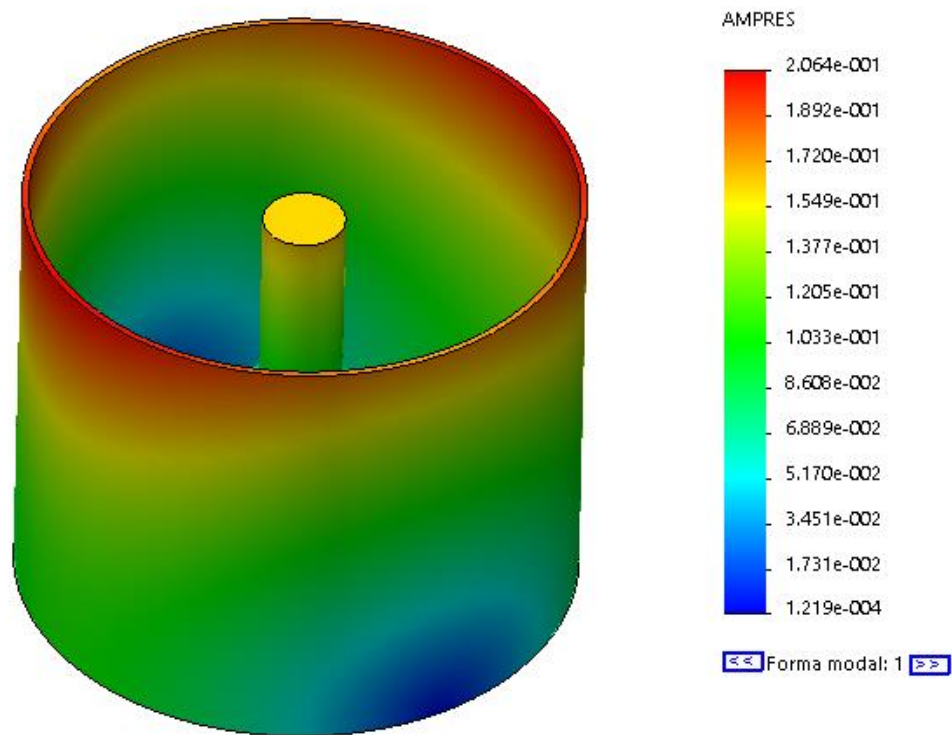
$$K_m = \frac{d_{am}^4 \cdot G}{8 \cdot D_{mm}^3 \cdot N_a} \quad [27]$$

Para o dimensionamento das molas utilizando-se o aço mola, de módulo de cisalhamento  $G = 137,5$  GPa e um arame de  $d_{am} = 10$ mm, em uma mola de oito espiras ativas ( $N_a = 8$ ) e diâmetro médio de  $D_{mm} = 60$ mm, chegando-se ao valor  $K_m = 97330,72$  N/m.

Considerando-se que a cuba é presa por dez molas e essas estão associadas em paralelo, a rigidez equivalente à condição de engaste da cuba é a soma das rigidezes individuais das molas. Para a realização da simulação de frequência natural, adotou-se a constante axial equivalente,  $K_m = 973307,29$  N/m. No entanto, é também necessário estimar a constante transversal da mola, para isso multiplicou-se por três (HILL, 1998) a constante elástica axial de uma mola, para o sistema a constante elástica transversal resultante  $K_{mt} = 2919921,87$  N/m.

Simulou-se, então, o modelo da cuba afim obter-se as 4 primeiras frequências naturais de vibração do sistema da cuba e seus respectivos modos de vibrar. A Figura 44 indica o modo de vibrar relativo a primeira frequência de ressonância,  $W_o = 8,43$ Hz.

Figura 44 – Modo de vibrar relativo à primeira frequência de vibração.



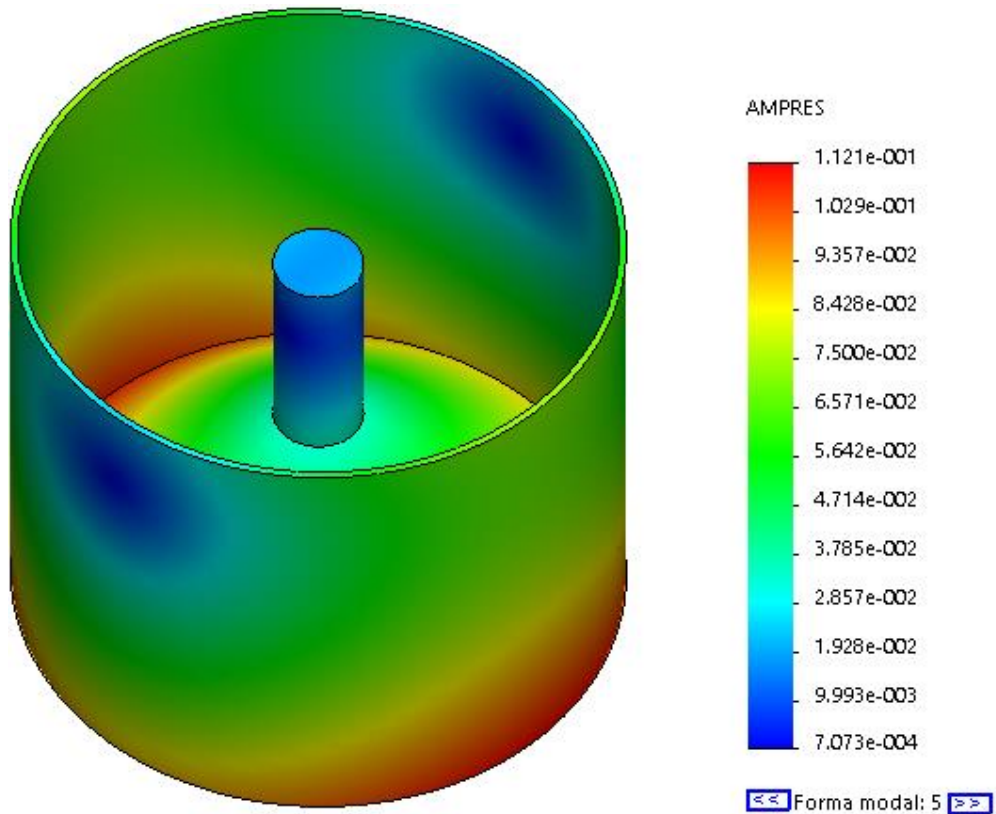
Os resultados oferecidos pelo Solidworks não fornecem os valores absolutos de amplitude, uma vez que não foram definidos os parâmetros relativos ao excitador do sistema. Nesse caso o gradiente de amplitude, ilustrado pela Figura 45, ilustra apenas o modo de vibrar, mas não oferece valores absolutos. A Tabela 17 indica as cinco primeiras frequências de ressonância encontrada para o sistema da cuba.

Tabela 17: Frequência de ressonância da cuba

Forma Modal	Frequência [Hz]
1	8,43
2	9,12
3	11,89
4	200,31
5	218,42

A Figura 46 indica a forma modal 5, relativa à frequência natural de vibração  $W_0 = 218,42$  Hz.

Figura 46 – Modo de vibrar relativo à primeira frequência de vibração.



Dessa forma deve-se evitar a utilização de tais frequências na operação do motor, pois amplitudes muito grandes seriam geradas, comprometendo o funcionamento do equipamento.

## 5. CONCLUSÕES E TRABALHOS FUTUROS

Diante da demanda por um equipamento de moagem, capaz de processar barbotinas à base de zircônia, buscou-se selecionar uma configuração de moinho que fosse adequada à tal aplicação. Utilizando-se critérios de projeto, avaliou-se e comparou-se as potenciais configurações de moinho, tais como: moinho de bolas, de atrito entre outros, e ratificou-se a opção pelo moinho vibratório vertical e por elementos de moagem cilíndricos.

No desenvolvimento do projeto, foi possível determinar a geometria da cuba, seguindo os requisitos previstos, dentre eles: capacidade de moagem mínima de 25 quilogramas de material por batelada, revestimento cerâmico para evitar contaminação, etc. A partir de três configurações iniciais buscou-se eleger uma delas considerando parâmetros qualitativos e quantitativos geométricos, de forma a melhor atender à demanda de processamento.

Primeiramente, equacionou-se os diâmetros das cubas em suas três possíveis configurações e parametrizou-se as constantes geométricas para que fosse possível estabelecer uma base de comparação. A densidade de empacotamento dos elementos de moagem cilíndricos mostrou-se um importante parâmetro para o dimensionamento da cuba. A partir de referências de estimou-se a densidade de empacotamento, adicionalmente calculou-se o efeito multiplicativo do erro da densidade no cálculo do diâmetro da cuba e do volume de barbotina processada.

Concluiu-se que a configuração número três atendeu, da melhor forma, aos requisitos de projeto. Em sua geometria interna, a presença da haste cilíndrica central, acentua o grau de movimentação dos elementos de moagem, uma vez que ela induz a velocidade em relação ao eixo de simetria da cuba. Tal artefato proporciona um melhor efeito de moagem quando comparada à configuração número um. Já o caimento cônico de sua base permite uma melhor captação de barbotina quando comparada à configuração número dois. O material tende a acumular-se próximo a extremidade, justamente onde localiza-se o furo de captação. Na configuração três, também foi possível estimar a densidade de empacotamento, e mesmo com sua imprecisão, decorrente do formato não convencional da cuba, foi possível fazer previsões do volume de barbotina e do diâmetro da cuba utilizando-se do efeito multiplicador do erro.

Validou-se a geometria da cuba em termos de resistência por meio de simulação estrutural estática, as tensões de Von-Mises ficaram muito abaixo da crítica, o fator de segurança mostrou-se alto. Também foi possível determinar as frequências naturais de vibração

No que diz respeito à trabalhos futuros, um próximo passo seria estimar a potência do motor do excitador mecânico. Para isso, SIDOR, 2005 oferece um modelo matemático para estimar a potência de moagem em moinhos vibratórios.

Seria recomendável também a exploração do dimensionamento das massas excêntricas do excitador mecânico, para que pudesse estimar em valores absolutos a amplitude de vibração da cuba. Nesse sentido, a determinação da aceleração da base também seria benéfica. Assim seria possível estimar as forças inerciais que solicitam as molas transversalmente, permitindo um cálculo mais preciso da constante elástica

## REFERÊNCIAS

- Disponível em: <<https://www.siebtechnik.com/>>. Acesso em: 01 Agosto 2018.
- randviewresearch.** Disponível em: <<https://grandviewresearch.com/industry-analysis/technical-ceramics-market>>. Acesso em: 2 Agosto 2018.
- Siebtechnik.** Disponível em: <<https://www.siebtechnik.com/>>. Acesso em: 23 Agosto 2018.
- ALESSANDRO R, Z. S. **Desenho Técnico Mecânico. Projeto e fabricação no desenvolvimento de produtos industriais.** São Carlos: Elsevier, 2015.
- ANDREAS GEBHARDT, J.-S. H. **Additive Manufacturing.** Munich: Hanser Publishers, 2016.
- BALAZ, P. *Mechanochemistry in Nanoscience and Minerals Engineering.* Berlin: Springer, 2008.
- C. BARRY CARTER, M. G. N. **Ceramic Materials - Science and Engineering.** Nova Iorque: Springer-Verlag New York, 2013.
- CARVALHO, R. C. D. **Projeto de um mini moinho vibratório auxiliado por técnicas de metodologia de projeto.** Escola de Engenharia de São Carlos, USP. São Carlos, p. 130. 2007.
- EBEHARD GOCK, K. E. K. Eccentric vibratory mills- theory and practice. **Powder Technology**, p. 9, 1999.
- FORTULAN, C. A. **Projeto e desempenho de um moinho vibratório para cerâmica avançada.** IV Congresso de Engenharia Mecânica Norte-Nordeste. Recife: [s.n.]. 1996. p. 6.
- HENNA TANGRI, Y. G. J. S. C. Packing of cylindrical particles: DEM simulations and. **Powder Tecnology**, v. 317, n. Elsevier, Novembro 2016.
- HILL, M. **Measurement of Bellows' Transverse Spring.** [S.l.]. 1998.
- NEIKOV, O. **Hand Book of Non-Ferrous Metal Powders.** Amsterdam: Elsevier, 2009.
- NETTO, J. M. J. **Projeto de uma miniextrusora dupla-rosca corrotativa vertical para aplicação em Manufatura Aditiva.** Universidade de São Paulo. São Carlos, p. 122. 2017.
- NORTON, R. L. **Projeto de máquinas: Uma abordagem Integrada.** 2<sup>a</sup>. ed. Massachusetts: Bookman, 2004.
- QUAN QIAN, X. A. Y. W. Y. W. L. W. Physical study on the vibrated packing densification of mono-sized cylindrical particles. **Particuology**, n. 29, Janeiro 2016.
- RALF RIEDEL, I.-W. C. **Ceramics Science and Technology.** Weinheim: WILEY-VHC, v. 2, 2010. ISBN 978-3-527-31156-9.
- REED, J. **Principles of Ceramics Processing.** [S.l.]: Wiley-Interscience, 1988. ISBN 0-471-59721-X.

RICHERSON, D. W. **Modern Ceramic Engineering Properties, Processing and Use in Design**. 2<sup>a</sup>. ed. [S.l.]: [s.n.], 1992.

SHABANA, A. **Theory of Vibration: An Introduction**. Chicago: Elsevier, v. I, 1991.

SHOGO ADACHI, M. I. Y. S. C. J. M. K. E. S. . E. A. Corundum-to-spinel structural phase transformation in alumina. **Elsevier**, 2015.

SIDOR, J. A mechanical layered model of a vibratory mill. **Mechanics and control**, Krakow, v. 29, 2005.

UKAREV, F. K. Ressonance and it application to a vibratory mill. **Minerals Engineering**, Novosibirsk, 13 Abril 2014. 4.

WELLENKAMP, F. J. **Moagem Fina e Ultrafina dos Minerais Industriais:uma revisão**. CETEM. Rio de Janeiro. 1999.