



## **PROJETO DE GRADUAÇÃO**

# **PROJETO DO SISTEMA MECÂNICO DE UM BRITADOR DE IMPACTO DE EIXO HORIZONTAL PARA PRODUÇÃO DE CALCÁRIO**

Por,  
**Fernando Gustavo Marques de Moraes**  
**Marcos Vinícius Azevedo Ximenes**

**Brasília, 21 de Junho de 2018**

**UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA**

**FACULDADE DE TECNOLOGIA  
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECANICA**

UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA  
Faculdade de Tecnologia  
Departamento de Engenharia Mecânica

## PROJETO DE GRADUAÇÃO

# PROJETO DO SISTEMA MECÂNICO DE UM BRITADOR DE IMPACTO DE EIXO HORIZONTAL PARA PRODUÇÃO DE CALCÁRIO

POR,

**Fernando Gustavo Marques de Moraes**  
**Marcos Vinícius Azevedo Ximenes**

Relatório submetido como requisito parcial para obtenção  
do grau de Engenheiro Mecânico.

### **Banca Examinadora**

Prof. **Thiago Doca**, UnB/ ENM (Orientador)

---

Prof. Dianne Magalhães Viana, UnB/ ENM

---

Prof. Adriano Todorovic Fabro, UnB/ ENM

---

Brasília, 21 de Junho de 2018

## **Agradecimentos**

*À Deus por me dar forças para chegar até o aqui.*

*Aos meus pais por terem me proporcionado todo apoio moral, ético e financeiro ao longo da minha vida.*

*Ao orientador Profº Dr. Thiago, por ter orientado o trabalho, com seu vasto conhecimento.*

*Fernando Gustavo Marques de Moraes*

*À minha família por ter me incentivado e apoiado incondicionalmente em todos os sentidos.*

*À Deus por ter me dado a cada dia força, determinação e coragem.*

*Ao orientador Profº Dr. Thiago que com sua experiência, conhecimento e orientação tornou possível a realização deste trabalho.*

*Marcos Vinícius Azevedo Ximenes*

---

## RESUMO

O presente texto tem como objetivo principal dimensionar um britador de impacto de eixo vertical para a produção de calcário, para tanto, será necessário dimensionar os martelos, anteparos e eixos, selecionar motor, acoplamento, correias, polias, parafusos, rolamentos e anéis de retenção. Os esforços sobre os componentes da máquina são determinados através de uma análise energética, para uma redução granulométrica das rochas calcárias de 50:1, entrada de rochas com 500 mm de tamanho médio e saída com 10 mm. Os martelos e anteparos, feitos de ferro fundido branco de alto-cromo, são dimensionados contra deflexão. O eixo, feito de aço AISI 1050 temperado e normalizado, é projetado de acordo com os critérios: estático, fadiga, deflexão linear, deflexão torcional e velocidade crítica, o mais crítico é assumido para determinar o diâmetro do mesmo. O material adotado para fabricar o rotor é o ferro fundido. A seleção dos componentes é realizada de acordo com as cargas advindas da análise energética. A carcaça é fabricada por meio de chapas de aço ASTM A36 soldadas e é projetada em duas partes para facilitar o acesso à parte interna do britador para eventuais manutenções. O britador opera em rotação de 480 rpm, com torque nominal de 738 kNm, fornecido por um motor elétrico de 2982 kW para uma produção de 200 t/h.

Palavras-chave: Britador, calcário, análise energética, martelos.

---

---

## ABSTRACT

The main text of this text is an impact crusher of the vertical axis for limestone production, for which it will be necessary to size the hammers, bulkheads and shafts, select motor, coupling, belts, pulleys, screws, bearings and retaining rings. The data on the components of the machine are impinged through an energy analysis, for a granulometric reduction of the rocks of 50: 1, entrance of rock with 500 mm of average size and exit with 10 mm. The hammers and bulkheads, made of high-chromium white cast iron, are dimensioned against deflection. The axis, made of tempered and normalized AISI 1050 steel, is designed according to the following criteria: static, fatigue, linear deflection, torsional deflection and critical velocity, the most critical is the assumption for determining the diameter of the same. The material used to manufacture the rotor is cast iron. The selection of the components is performed according to the loads coming from the energy analysis. The housing is manufactured using ASTM A36 welded steel plates and is designed in two parts to facilitate access to the inside of the refrigerator for maintenance. The crusher operates at a speed of 480 rpm, nominal torque of 738 kNm, supplied by an electric motor of 2982 kilowatts for a production of 200 t / h.

Keywords: Crusher, limestone, energy analysis, hammers.

---

# SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO</b>	<b>14</b>
1.1	CONTEXTUALIZAÇÃO	14
1.2	DESCRIÇÃO DA MÁQUINA	15
1.3	OBJETIVOS GERAIS	17
1.4	OBJETIVOS ESPECÍFICOS	17
1.5	METODOLOGIA	17
1.6	ESTRUTURA DO TRABALHO	18
<b>2</b>	<b>REVISÃO TEÓRICA</b>	<b>19</b>
2.1	PROCESSOS DE PRODUÇÃO DA CAL	19
2.2	EXTRAÇÃO DAS ROCHAS CALCÁRIAS OU DOLOMÍTIAS DAS MINAS	19
2.3	BRITAGEM	20
2.4	CALCINAÇÃO	21
2.5	BRITAGEM – REDUÇÃO PARA PARTÍCULAS MENORES QUE 10 µm	24
2.6	BRITAGEM PÓS CALCINAÇÃO	25
2.7	HIDRATAÇÃO	25
2.8	MINERAÇÃO DO CARBONATO DE CÁLCIO PRECIPITADO (PCC)	27
2.9	MINERAÇÃO DO CARBONATO DE CÁLCIO NATURAL (GCC)	31
2.10	TIPOS DE BRITADORES UTILIZADOS NOS PROCESSOS	32
2.10.1	CHOQUE E IMPACTO	32
2.10.2	COMPRESSÃO OU ESMAGAMENTO	33
2.10.3	ABRASÃO POR CISALHAMENTO	33
2.11	EQUIPAMENTOS DE BRITAGEM	34
2.11.1	BRITADOR DE MANDÍBULAS	35
2.11.2	BRITADOR DE IMPACTO	36
2.11.3	BRITADOR DE IMPACTO COM EIXO HORIZONTAL	37
2.11.4	BRITADOR DE IMPACTO DE EIXO VERTICAL	38
2.11.5	BRITADORES DE MARTELOS	39
2.11.6	BRITADOR DE ROLO DENTADO	40
2.11.7	MOINHOS DE BOLAS	41
<b>3</b>	<b>PROJETO CONCEITUAL</b>	<b>44</b>
3.1	DESGASTE EROSIVO	44
3.2	RECOMENDAÇÕES DE UTILIZAÇÃO DOS BRITADORES	48
3.3	PROBLEMAS COMUNS NOS BRITADORES, CAUSAS E SOLUÇÕES COMUMENTE ADOTADAS	50
3.4	MATRIZ DE DECISÃO	53
3.5	ANÁLISE ENERGÉTICA	54
3.6	ANÁLISE DE FORÇAS	58
3.7	PROTEÇÃO CONTRA IMPACTO (ANTEPARO/BIGORNA)	60
3.8	PROPOSIÇÃO DE CONCEITO	61
<b>4</b>	<b>DIMENSIONAMENTO</b>	<b>63</b>
4.1	PROJETO DO MARTELO	63
4.2	PROJETO DO ANTEPARO	69
4.3	PROJETO DO EIXO	72
4.3.1	ANÁLISE ESTÁTICA	73
4.3.2	ANÁLISE DE FADIGA	74
4.3.3	ANÁLISE DE DEFLEXÃO LINEAR	77
4.3.4	ANÁLISE DE DEFLEXÃO ANGULAR	77
4.3.5	VELOCIDADE CRÍTICA	78
4.3.6	DIMENSIONAMENTO DO EIXO	79
4.3.7	CÁLCULO DAS REAÇÕES NOS APOIOS	80
<b>5</b>	<b>SELEÇÃO DOS COMPONENTES E FABRICAÇÃO</b>	<b>85</b>
5.1	COMPONENTES	85
5.2	SELEÇÃO DOS PARAFUSOS DE FIXAÇÃO	86
5.3	MOTOR ELÉTRICO E REDUTOR	91
5.4	CORREIAS E POLIAS	94
5.5	ROLAMENTOS	98

5.6	ANÉIS DE RETENÇÃO.....	100
5.7	ESTRIAS.....	101
5.8	ACOPLAMENTO ELÁSTICO.....	105
5.9	PROCESSOS DE FABRICAÇÃO.....	106
5.10	TOLERÂNCIAS E AJUSTES.....	106
5.11	TOLERÂNCIAS GEOMÉTRICAS.....	112
5.12	ESTADO DE SUPERFÍCIE.....	114
5.13	TOLERÂNCIA PARA AS ESTRIAS.....	116
5.14	RESULTADO DAS TOLERÂNCIAS.....	116
<b>6</b>	<b>ANÁLISE DE CUSTOS E VIABILIDADE.....</b>	<b>117</b>
6.1	LISTA DE COMPONENTES.....	117
6.2	ESTIMATIVA DE MATERIAL, CUSTO DE FABRICAÇÃO E COMPRA DOS COMPONENTES.....	117
6.3	ANÁLISE DE PAYBACK.....	120
<b>7</b>	<b>CONCLUSÕES.....</b>	<b>124</b>
	<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....</b>	<b>126</b>
	<b>APÊNDICES.....</b>	<b>130</b>
A.1	– Apêndice 1.....	130
A.2	– Apêndice 2.....	132
A.3	– Apêndice 3.....	132

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Britador de Impacto de eixo horizontal (METSO, 2005). .....	16
Figura 2. Vista em perfil de um britador de impacto de eixo horizontal em funcionamento (METSO, 2005). .....	16
Figura 3. Rocha Dolomítica (INDUCAL,2008). .....	20
Figura 4. Moinho de Rolos. ....	21
Figura 5. Forno de Calcinação vertical. ....	23
Figura 6. Forno de Calcinação rotativo. ....	23
Figura 7. Forno rotativo com inclinação. ....	24
Figura 8. Hidratação da cal virgem (INOVATRONIC). ....	26
Figura 9. Fluxograma dos processos de produção do carbonato de cálcio. ....	27
Figura 10. Processo industrial do carbonato de cálcio precipitado (DALLAROSA, 2011)....	29
Figura 11. Pedra de Cal virgem com 1” de diâmetro médio (DALLAROSA, 2011) .....	29
Figura 12. Crumbles, Cal moído e “Slurry” (DALLAROSA, 2011). ....	30
Figura 13. Processos de produção do GCC (DALLAROSA, 2011). ....	32
Figura 14. Distribuição granulométrica das partículas de acordo com o mecanismo de fragmentação utilizado (CARVALHO, 2012). ....	34
Figura 15. Britador de Mandíbulas de um Eixo (METSO, 2005). ....	35
Figura 16. Britador de Mandíbula de dois eixos (METSO, 2005). ....	36
Figura 17. Desenho esquemático de um impactor (METSO,2005) .....	37
Figura 18. Impactor de rolos horizontais (METSO, 2005). ....	38
Figura 19. Desenho esquemático do percurso do material na câmara de britagem de um Britador de Impacto Vertical (METSO, 2005). ....	39
Figura 20. Britadores de Martelos de 1 e 2 eixos (THYSSENKRUPP, 2003). ....	39
Figura 21. Britador de rolo dentado (FIGUEIRA, 2004). ....	40
Figura 22. Moinhos de Bolas - arranjos de descarga por Overflow e Diafragma, respectivamente (ROWLAND, 1978). ....	41
Figura 23. Martelo industrial triturador: (a) Representação esquemática de esmagamento operacional (b) vista real do triturador de martelo e (c) vista de rotor. (KALLEL, ZOUCHE, ANTAR, BAHRI, ELLEUCH, 2017). ....	45
Figura 24. (a) Rochas barita antes do esmagamento com partículas de tamanho de 0-100 mm e (b) Rochas barita com tamanho de partícula de 0-5 mm. (KALLEL, ZOUCHE, ANTAR, BAHRI, ELLEUCH, 2017). ....	45
Figura 25. Martelo vista superfície danificada: (a) superfície lateral, (b) superfície superior e (c) a superfície de canto. (KALLEL, ZOUCHE, ANTAR, BAHRI, ELLEUCH, 2017). ....	46
Figura 26. Vista geral de (a) martelo não usado, (b) martelo desgastado (KALLEL, ZOUCHE, ANTAR, BAHRI, ELLEUCH, 2017). ....	47
Figura 27. Ilustração esquemática de carbonetos de desprendimento da matriz. (KALLEL, ZOUCHE, ANTAR, BAHRI, ELLEUCH, 2017). ....	48
Figura 28. Variação do consumo de energia em função do tamanho da partícula (GALERY, 2011). ....	55
Figura 29. Energia para redução de 500 mm até 10 mm. ....	58
Figura 30. Forças atuantes na cominuição do calcário. ....	59
Figura 31. Vista lateral de bigornas fixas montadas em um mostruário (KALLEL, ZOUCHE, ANTAR, BAHRI, ELLEUCH, 2017) .....	60
Figura 32. Vista isométrica do britador. ....	61
Figura 33. Vista isométrica do centro do britador montado. ....	62
Figura 34. Vista explodida do centro do britador. ....	62

Figura 35. Desenho do martelo utilizando o software CATIA V5. A figura está em escala 15:1.....	64
Figura 36. Aplicação da carga distribuída e condições de contorno no software ABAQUS versão 6.14-1. A figura está em escala de 15:1.....	68
Figura 37. Campo de tensões obtido por simulação com elementos finitos no software ABAQUS versão 6.14-1. A figura está em escala de 15:1.....	69
Figura 38. Forças distribuídas ao longo da área de contato do anteparo e engastamento da parte inferior no software ABAQUS versão 6.14-1.....	72
Figura 39. Campo de tensões de Von Mises obtido no software ABAQUS versão 6.14-1. A figura está em escala de 15:1.....	72
Figura 40. DCL do eixo.....	79
Figura 41. Representação esquemática do eixo.....	80
Figura 42. Diagrama de esforço cortante do eixo.....	83
Figura 43. Diagrama de momento fletor do eixo.....	83
Figura 44. Disposição dos 14 parafusos na montagem do rotor.....	86
Figura 45. Diagrama de corpo livre dos parafusos da união dos rotores com os martelos. O traço interno indica a presença de rosca. Fora de escala.....	87
Figura 46. Ilustração do modelo de motor selecionado (WEG, 2016).....	93
Figura 47. Redutor selecionado (BONFIGLIOLI, 2010).....	94
Figura 48. Perfil da correia Micro V série L (CATALOGO GATES, 2011).....	97
Figura 49. Representação das dimensões da polia motora (CORREIAS SCHNEIDER, 2008).....	98
Figura 50. Rolamento autocompensador de rolos (SKF BRASIL, 2018).....	100
Figura 51. Tipos de estrias e parâmetros geométricos (SHIGLEY, 2011).....	102
Figura 52. Representação das dimensões do acoplamento elástico selecionado (ECOTORK, 2011).....	105
Figura 53. Qualidade de trabalho para o sistema eixo furo ( NBR 6158).....	107
Figura 54. Interferências máxima e mínima (NBR 6158).....	110
Figura 55. Tolerâncias Geométricas (NBR 2768-2).....	113
Figura 56. Classificação das rugosidades de acordo com o processo de fabricação (NBR 8404).....	115
Figura 57. Evolução do valor presente líquido acumulado.....	122

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1. Moinhos de bolas- Tipos e características (CARVALHO, 2012) .....	42
Tabela 2. Principais tipos de britadores e suas características (CARVALHO, 2012). .....	<b>Erro!</b>
<b>Indicador não definido.</b>	
Tabela 3. Propriedades mecânicas do martelo feito de ferro fundido branco ao cromo (KALLEL, ZOUC, ANTAR, BAHRI, ELLEUCH, 2017). .....	44
Tabela 4. Comparação de dimensões e massa entre o martelo não usado e desgastado (KALLEL, ZOUC, ANTAR, BAHRI, ELLEUCH, 2017). .....	47
Tabela 5. Aplicação operacional de cada britador. (SANTANA e CHARBEL, 2009). .....	49
A Tabela 6, de Santana e Charbel, (2009), relaciona os problemas dos britadores com suas respectivas causas e soluções comumente adotadas.....	50
Tabela 7. Composição de uma amostra de rocha calcária, retirada da MOCAL, ES. (FREITAS, 2008) .....	52
Tabela 8. Matriz de decisão para os problemas apresentados pelos tipos de britadores. ....	53
Tabela 9. Propriedades físicas e mecânicas do carbonato de cálcio. ....	54
Tabela 10. Índice de trabalho (Wi) e peso específico médio de alguns minerais. (Galery, 2011). .....	57
Tabela 11. Propriedades mecânicas do martelo feito de ferro fundido branco de alto-cromo (KALLEL, ZOUC, ANTAR, BAHRI, ELLEUCH, 2017). .....	63
Tabela 12. Propriedades físicas e geométricas do martelo feito de ferro fundido branco de alto-cromo (KALLEL, ZOUC, ANTAR, BAHRI, ELLEUCH, 2017) .....	64
Tabela 13. Propriedades físicas do anteparo feito de ferro fundido branco de alto-cromo. ....	70
Tabela 14. Cargas suportadas pelo eixo. ....	73
Tabela 15. Fatores para dimensionamento do eixo. ....	84
Tabela 16. Resultados obtidos para o eixo. ....	84
Tabela 17. Informações gerais preliminares sobre os parafusos pré-selecionados :(BUDYNAS; NISBETT, 2016) .....	88
Tabela 18. Dados do parafuso selecionado.....	88
Tabela 19. Rigidez do parafuso.....	89
Tabela 20. Rigidez do material. ....	89
Tabela 21. Coeficiente de fração da carga.....	89
Tabela 22. Fator de segurança contra separação da junta.....	90
Tabela 23. Tensão devido a pré-carga no parafuso selecionado.....	90
Tabela 24. Tensões equivalentes para o parafuso pré-selecionados. ....	90
Tabela 25. Fator de segurança.....	91
Tabela 26. Especificações da seleção final de parafusos.....	91
Tabela 27. Rendimentos recomendados (ANTUNES, 2000) .....	92
Tabela 28. Características do motor selecionado (WEG, 2016). .....	93
Tabela 29. Características do redutor selecionado (BONFIGLIOLI, 2010).....	93
Tabela 30. Dimensões da polia motora selecionada (CORREIAS SCHNEIDER, 2008).....	97
Tabela 31. Aspectos do rolamento selecionado .....	100
Tabela 32. Características do anéis de retenção (SEEGER, 2009) .....	101
Tabela 33. Tipos de estrias e suas dimensões (SHIGLEY, 2011).....	101
Tabela 34. Resultados dos parâmetros calculados para as estrias ligadas a polia movida na extremidade do eixo rotor. ....	104
Tabela 35. Resultados dos parâmetros calculados para as estrias ligadas a polia movida na extremidade do eixo rotor. ....	104
Tabela 36. Características do acoplamento elástico selecionado (ECOTORK, 2011).....	105
Tabela 37. Processos de fabricação e materiais das peças do britador.....	106

Tabela 38. $\Delta D$ de acordo com o diâmetro nominal e qualidade (NBR 6158). .....	108
Tabela 39. Valores de tolerância para o eixo ( $\Delta D = \Delta d$ ) para usinagem (NBR 6158).....	108
Tabela 40. Valores de tolerância para o eixo ( $\Delta D = \Delta d$ ) para usinagem (NBR 6158).....	110
Tabela 41. Resultados dos ajustes com interferência. ....	111
Tabela 42. Tolerâncias gerais para perpendicularidade (NBR 2768-2). ....	113
Tabela 43. Classificação das rugosidades $R_a$ (NBR 8404).....	114
Tabela 44. Valores de rugosidades médias ( NBR 8404). ....	115
Tabela 45. Tabela de faixas de tolerância para estrias (Norma DIN 5480).....	116
Tabela 46. Resultados das tolerâncias. ....	116
Tabela 47. Lista de componentes, especificações, material e quantidade. ....	117
Tabela 48. Estimativas de preço de aquisição do material e demais componentes. ....	118
Tabela 49. Custos referentes aos processos de fabricação escolhidos .....	119
Tabela 50. Custo estimado dos tratamentos térmicos. ....	119
Tabela 51. Custo final do projeto. ....	120
Tabela 52. Fluxo de caixa do britador. ....	121
Tabela 53. Lucro anual em diferentes aplicações. ....	123

# LISTA DE SÍMBOLOS

## Símbolos Latinos

$A$	Área	[m <sup>2</sup> ]
$T$	Temperatura	[°C]
$L$	Comprimento	[m]
$D$	Diâmetro	[m]
$H_a$	Potência no eixo de entrada	[kW]
$H_c$	Potência no eixo de saída da caixa redutora	[kW]
$W^t$	Carga Transmitida	[N]
$b_c$	Largura de Face	[mm]
$b$	Largura de Face do elemento mais estreito	[mm]
$m_t$	Módulo Métrico transversal	[mm]
$Z_E$	Coeficiente elástico	$[\sqrt{N/mm^2}]$
$d_{w1}$	Diâmetro de passo do pinhão	[mm]
HB	Dureza Brinell	

## Símbolos Gregos

$\mu$	Micro	10 <sup>-6</sup> m
$\alpha$	Difusividade térmica	[m <sup>2</sup> /s]
$\Delta$	Variação entre duas grandezas similares	
$\rho$	Massa específica	[m <sup>3</sup> /kg]
$\eta_t$	Eficiência total do sistema	[%]
$\sigma$	Tensão Flexional	[MPa]

## Grupos Adimensionais

$K_o$	Fator de Sobrecarga
$K_v$	Fator Dinâmico
$K_s$	Fator de Tamanho
$K_m$	Fator de Distribuição
$K_b$	Fator de Espessura de aro
$K_i, K_h$	Fator de Distribuição de Carga
$K_t$	Fator de temperatura
$Y_j$	Fator Geométrico para resistência flexional
$Z_R$	Fator de Condição superficial
$Z_I$	Fator Geométrico para resistência ao crateramento

## Subscritos

rol	Rolamento
a	Eixo a (eixo de entrada da caixa redutora)
c	Eixo c (eixo de saída da caixa redutora)
c	Tensão de contato
f	Fadiga por flexão
dentes retos	Engrenagem de dentes retos
dentes <i>helic</i>	Engrenagem de dentes helicoidais

## Siglas

$\text{CaCO}_3$	Carbonato de Cálcio
$\text{Fe}_2(\text{OH})_3$	Limonita
$\text{FeS}_2$	Pirita
GCC	Carbonato de Cálcio moído
PCC	Carbonato de Cálcio Precipitado
CaO	Cal Virgem
$\text{Ca}(\text{OH})_2$	Cal Hidratada
DNPM	Departamento Nacional de Produção Mineral
$\text{CO}_2$	Gás Carbônico
NM	Norma de Mineração
ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
NBR	Norma Brasileira Reguladora
Slurry	Nome Industrial para lama de carbonato de Cálcio
Mg	Magnésio
MgO	Óxido de Magnésio
$\text{FeCO}_3$	Siderita
$\text{MgCO}_3$	Magnesita
PR	Sigla do Estado do Paraná
SP	Sigla do Estado de São Paulo
COPEL	Companhia Paranaense de Energia
ANEEL	Agência Nacional de Energia Elétrica
HSI	Eixo de Impacto Horizontal
VSI	Eixo de Impacto Vertical
AGMA	Associação Americana dos fabricantes de engrenagens

# 1 INTRODUÇÃO

*Neste capítulo são apresentados o contexto do trabalho, descrição da máquina estudada, objetivos e a estrutura textual adotada.*

## 1.1 CONTEXTUALIZAÇÃO

O carbonato de cálcio é um mineral de ocorrência natural, está em todo o planeta e frequentemente em alta pureza, o que facilita seu processo de extração. Este mineral é formado através da composição óssea de animais depositados no solo e no fundo dos oceanos e rios, ao longo de milhares de anos, sob pressão atmosférica constante, podendo ser chamado de várias formas: pedra de cal, mármore e giz.

Cada um desses depósitos pode ser explorado e processado para a sua utilização em vários mercados, dependendo do foco e da necessidade. O mesmo possui larga aplicabilidade em diversas áreas industriais, tais como: cimento, papel, materiais refratários, plásticos, borracha, tintas, adesivos, inseticidas, pesticidas, produtos alimentícios e farmacêuticos, catalisadores, absorventes, dentifrícios, clarificantes, fertilizantes, gesso, auxiliares de filtração, cosméticos, produtos químicos, detergentes e abrasivos, além de cargas de enchimento para diversas finalidades.

As rochas carbonadas comumente comercializadas no mundo, são de dois tipos calcário e dolomito. Os calcários e dolomitos, de acordo Sampaio e Almeida (2008) são rochas sedimentares com composição formada basicamente por calcita ( $\text{CaCO}_3$ ) e um mineral dolomita ( $(\text{CaCO}_3)_3(\text{MgCO}_3)_2$ ), respectivamente. A calcita apresenta maior valor econômico se comparada às demais, dolomita, mármore e greda ou giz.

O processamento das rochas carbonadas, em especial as calcárias, depende das especificações e características do produto final. A lavra seletiva, a catação manual, a britagem em estágio unitário, processo que há utilização de britadores que realizam a diminuição do tamanho das pedras brutas extraídas das fontes minerais, e o peneiramento são os métodos comumente realizados para obtenção de produtos, cuja utilização final não exija rigorosos controles de especificações. Quando necessita-se obter produtos cujas aplicações são tidas como nobres para indústrias de: papel, plásticos, tintas, borrachas, entre outros, é necessário um complexo processo de beneficiamento. Nestes casos, se houver uma mínima contaminação por ferro, por exemplo, exige-se a prática da moagem, empregando-se moinhos específicos para cada caso.

Na mineração do carbonato de cálcio, Dallarosa (2011) mostrou que as indústrias se confrontam diariamente com o desafio de inovar os processos internos para a redução de custos, melhorias nos sistemas mecânicos dos seus equipamentos, otimização do tempo, a fim de maximizar o rendimento dos processos que utilizam insumos e muitas vezes, minimizar a própria mão de obra, através de automação industrial, sendo uma característica do ramo minerador, agregar valor à matéria prima extraída do solo até se tornar um insumo para outras empresas. Um dos problemas recorrentes é o aparecimento de desgaste dos componentes de tritura do britador (martelo e anteparo) ao longo do tempo, reduzindo a vida útil desses componentes e da máquina. Esse problema ocasiona alta frequência de manutenção dos equipamentos, gerando altos custos as empresas desse ramo.

## **1.2 DESCRIÇÃO DA MÁQUINA**

Um britador de impacto de eixo horizontal é um equipamento de britagem de alta capacidade que consiste em um eixo rotor que possui em uma de suas extremidades uma polia com múltiplas pistas, onde são acopladas correias, sendo estas e as polias, acopladas ao eixo de saída de um redutor que está conectado por meio de um acoplamento a um motor elétrico, responsáveis por transmitir a potência necessária ao eixo do britador. Neste eixo são fixados os martelos, componentes que são responsáveis por transmitir energia cinética as rochas despejadas na entrada de alimentação da máquina.

Essas rochas recebem essa categoria de energia do martelo (corpos em movimentos circulares ou cadentes) e são lançadas contra um anteparo que fratura as mesmas, pois são aplicadas forças de forma rápida e em intensidade muito superior à resistência das partículas a fragmentação. Os martelos possuem uma geometria extremamente adequada para realizar esse processo e os mesmos dispõem também de elevado torque fornecido pelo eixo rotor. Este é o mecanismo mais eficiente em termos de utilização da energia.

Na Figura 1 é apresentado um britador de impacto de eixo horizontal e todos os componentes que o integram.

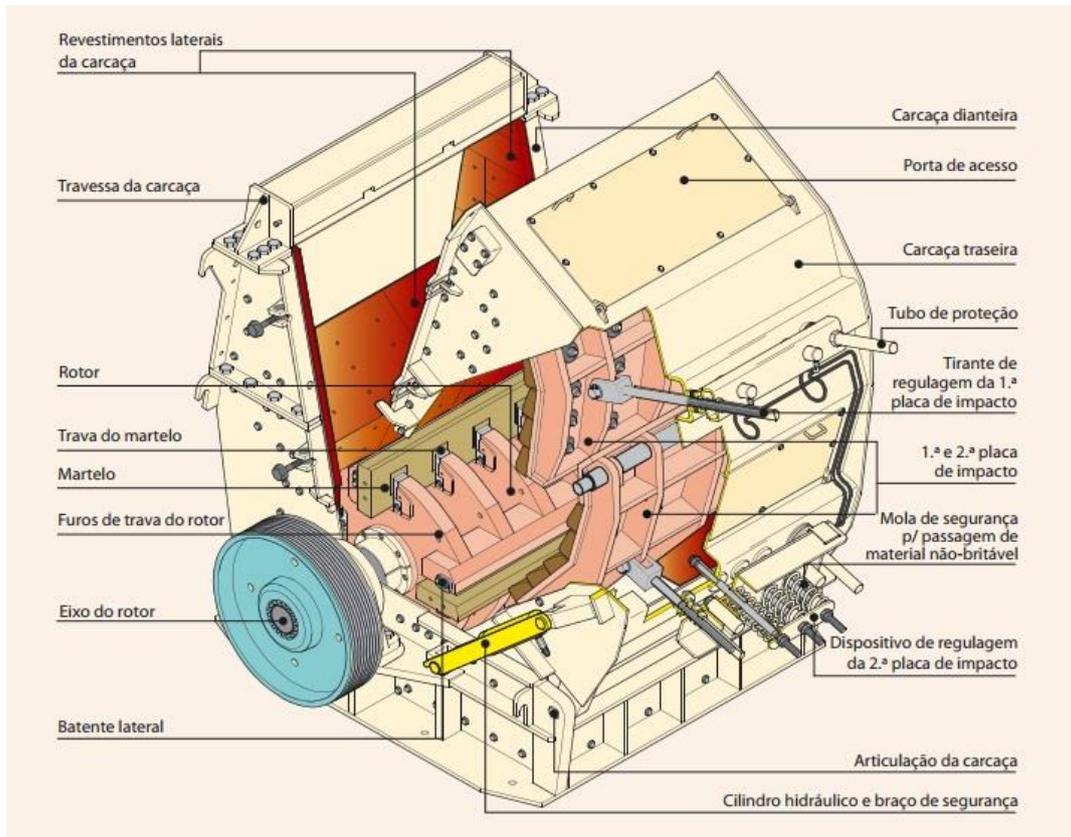


Figura 1. Britador de Impacto de eixo horizontal (METSO, 2005).

Na Figura 2 é exibido um britador de impacto de eixo horizontal em funcionamento. É possível observar que durante a fragmentação é produzido um grande número de partículas em uma vasta faixa granulométrica.

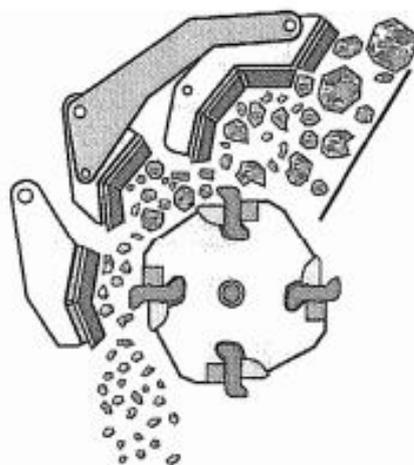


Figura 2. Vista em perfil de um britador de impacto de eixo horizontal em funcionamento (METSO, 2005).

### **1.3 OBJETIVOS GERAIS**

Projetar um britador de impacto de eixo vertical para produção de calcário e propor melhorias para os martelos do britador.

### **1.4 OBJETIVOS ESPECÍFICOS**

Analisar os processos de desgaste nos martelos do britador de impacto de eixo horizontal. Realizar um estudo da manutenção dos britadores usados para moer calcário. Propor uma solução para minimizar o desgaste prematuro dos componentes da máquina. Realizar uma análise energética, de acordo com a teoria de fragmentação de minérios, para identificar a energia necessária para reduzir a granulometria do calcário. Identificar e calcular os esforços mecânicos. Simular os esforços no martelo e no anteparo com o objetivo de encontrar os campos de tensão e deformação. Dimensionar e selecionar os componentes do britador, de acordo com a análise energética.

### **1.5 METODOLOGIA**

Primeiramente será realizada uma análise energética, através da teoria de fragmentação de minérios, com o objetivo de obter a quantidade de energia necessária para reduzir uma rocha esférica (hipótese adotada) de 500 mm de diâmetro para 10 mm. Essa energia será convertida em um torque, que será convertido em uma força. Essa força será utilizada para dimensionamento e seleção dos principais componentes do britador de impacto.

Para o dimensionamento do martelo, será calculado o maior momento devido à essa força oriunda da análise energética, e comparado com o maior momento admissível, que será calculado de acordo com a teoria de Shigley, Budynas e Nisbett. Também será realizado uma análise por elementos finitos no martelo para obtenção do coeficiente de segurança contra flexão. Esse mesmo procedimento será adotado para o dimensionamento do anteparo.

O eixo será dimensionado de acordo com 4 análises: Estática, fadiga, deflexão linear e angular e velocidade crítica. O critério mais crítico será adotado e a velocidade de rotação do eixo será definida para evitar vibrações indesejadas.

Os parafusos de fixação serão selecionados de acordo com o procedimento sugerido por Shigley, Budynas e Nisbett. Somente será considerada a pré-carga, uma vez que não há a presença de forças externas no modelo proposto por nós.

O motor elétrico será selecionado de acordo como a energia necessária para gerar a força calculada na análise energética e rotação do eixo, que será definida no dimensionamento do eixo pelo critério de velocidade crítica.

As correias serão selecionadas de acordo com o torque que irão transmitir ao eixo, de acordo com a metodologia adotada por Shigley, Budynas e Nisbett.

Os rolamentos serão selecionados de acordo com o diâmetro do eixo e com as reações nos mancais, advindos do dimensionamento do eixo. Anéis de retenção serão dimensionados com o objetivo de garantir que os rolamentos não se desloquem axialmente.

## **1.6 ESTRUTURA DO TRABALHO**

Este trabalho está estruturado em sete capítulos. O segundo capítulo descreve todas as etapas da produção do calcário, do GCC e do PCC em duas indústrias especializadas no Brasil. Uma em Mogi Guaçu – SP (PCC) e outra em Ponta Grossa – PR (GCC). Esse capítulo também descreve os tipos de britadores que são utilizados nos processos de produção do carbonato de cálcio na forma de PCC e GCC.

O terceiro capítulo detalha o projeto conceitual, baseado no desgaste erosivo dos martelos dos britadores, trata também da análise energética, de acordo com a teoria de fragmentação de minérios, para a identificação dos esforços para uma redução de 50 vezes.

O quarto capítulo consiste no projeto do rotor, eixo, dos anteparos e dos martelos.

O quinto capítulo apresenta a seleção dos componentes do britador, que são os parafusos de fixação, o sistema de acionamento, as correias e polias, rolamentos, anéis de retenção, estrias e acoplamento elástico. Esse capítulo também trata dos processos de fabricação das peças bem como os ajustes e tolerâncias para os mesmos.

O sexto capítulo consiste em uma análise de custos para a fabricação do britador, bem como uma análise de payback para o mesmo.

O sétimo capítulo traz as conclusões deste trabalho.

## 2 REVISÃO TEÓRICA

*Neste capítulo serão abordados processos da produção da cal, desde sua extração da natureza em forma de calcário até a sua utilização final. Também serão descritas as máquinas utilizadas em cada um dos processos para a obtenção da cal.*

### 2.1 PROCESSOS DE PRODUÇÃO DA CAL

Segundo o grupo Votorantim (2017), a produção da Cal, a partir do calcário ou dolomito se dá através de 6 processos. Primeiramente se extrai a rocha calcária ou dolomítica da natureza com o uso de máquinas apropriadas para mineração e explosivos, logo em seguida é feita uma britagem em 2 estágios para diminuição da granulometria, o primeiro estágio reduz os blocos de rocha em até 500 mm, e o segundo em até 10 mm, tamanho este ideal para o processo seguinte, que é a calcinação. Na calcinação as rochas com aproximadamente 10 mm de diâmetro são aquecidas com o intuito de retirar dos átomos de carbono e outras impurezas. Esse processo é realizado em fornos que operam em temperaturas que oscilam entre 900 °C e 1300 °C, temperatura esta que é função da quantidade de impurezas presentes na rocha que está sendo calcinada, geralmente calcário ou dolomito. Logo em seguida é feita a hidratação da cal, que consiste em transformar a cal virgem (CaO), que é altamente reativa, em cal hidratada (Ca(OH)<sub>2</sub>). Logo após a calcinação o material passa por uma nova britagem (em moinhos de rolos e de bolas) e por peneiras dimensionadas, com o objetivo de fornecer granulometria adequada ao produto. Após esta última etapa é feito o ensacamento e distribuição.

Logo abaixo, serão descritos, de forma detalhada, cada um dos 6 processos para a produção da cal.

### 2.2 EXTRAÇÃO DAS ROCHAS CALCÁRIAS OU DOLOMÍTICAS DAS MINAS

A obtenção do calcário começa pela extração da rocha calcária ou dolomítica na mina, que geralmente são lavradas a céu aberto por razões técnicas, ambientais ou de escala de produção. De todas as minas de extração no Brasil, cujas informações são fornecidas pelo DNPM, apenas uma possui operação mista, ou seja, extrai a lavra a céu aberto e também lavra subterrânea, operando todas as demais a céu aberto, segundo Sampaio e Almeida (2009).

Em seguida, a lavra é levada até britadores por carregadeiras ou esteiras transportadoras, e caminhões de alta capacidade (carregadeira Liebherr/JCB/Dynamic e caminhões fora de estrada). A Figura 3 mostra o estado em que as rochas se encontram após o processo de extração da natureza.



Figura 3. Rocha Dolomítica (INDUCAL,2008).

Disponível em: <http://www.inducal.com.br/>. Acesso em ago.2017.

Em grandes minerações é comum a terceirização das operações de lavra e transporte do calcário. Entretanto, em muitos casos, estas etapas da mineração estão no complexo geral das operações da própria empresa, em especial, para as minas próximas aos centros urbanos, de acordo com Sampaio e Almeida (2009). Logo em seguida ocorrendo o beneficiamento através de britagem.

## 2.3 BRITAGEM

Segundo o grupo Votorantim (2017), a britagem geralmente ocorre em dois estágios, primário e secundário, o que os difere é capacidade de redução das rochas, com objetivo final de se obter uma especificação granulométrica desejada. Após essa diminuição dos tamanhos das rochas de calcário que ocorre em peneiras dimensionadas para cada produto fim, é feito o transporte dessas rochas, através de transportadoras de correias, para os fornos de calcinação.

Após passarem pela calcinação, a rocha deve reduzir mais ainda a sua granulometria, com o objetivo de caracterizá-la, segundo Sampaio e Almeida (2009), em dois níveis de granulometria, uma fina com partículas menores que  $45\mu\text{m}$  e outra ultrafina com grãos menores que  $10\mu\text{m}$ .

A Figura 4 exemplifica um classificador de cal, utilizado no processo de produção do carbonato de cálcio a seco (GCC). A cal virgem (rocha já calcinada) é depositada no tanque de

espera, e vai descendo, pelo efeito da gravidade até o moinho de rolos que pressiona as pedras com diâmetro médio de 1” contra as paredes do cilindro, reduzindo a sua granulometria, um ventilador infla ar na parte inferior fazendo com que o carbonato de cálcio moído siga para o silo de armazenagem. Se não atingirem a granulometria desejada existem bombas que recirculam as partículas até atingirem a granulometria desejada.

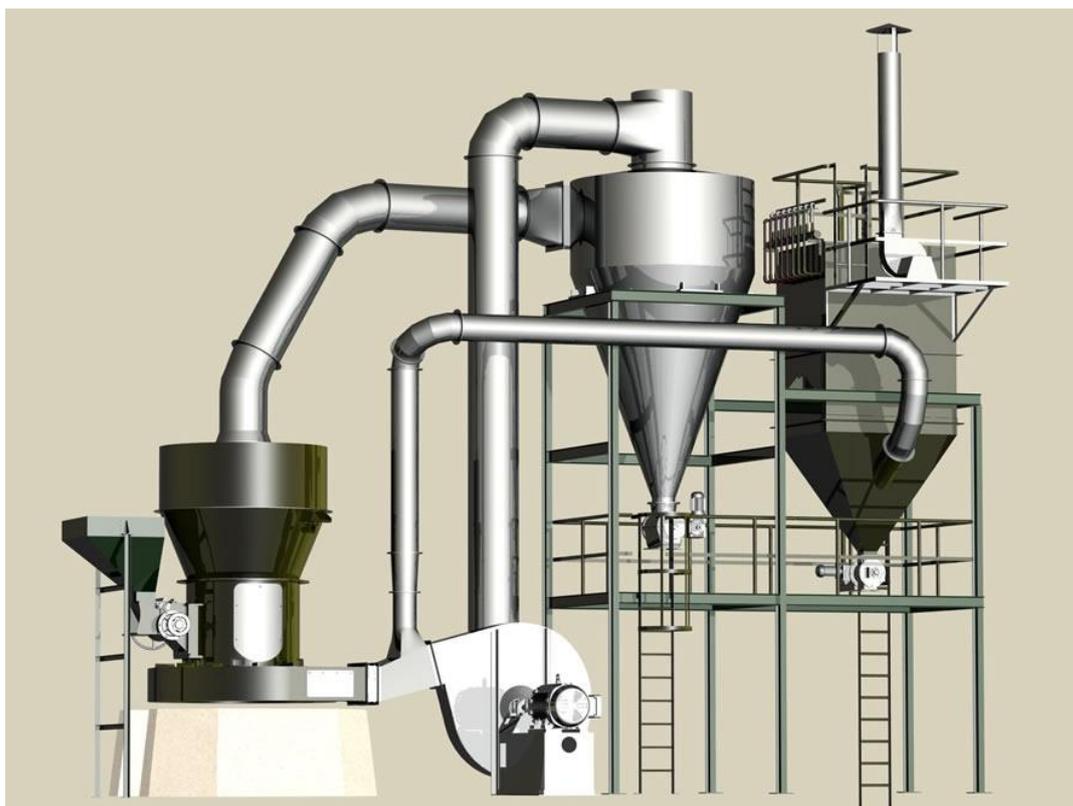


Figura 4. Moinho de Rolos.

Disponível em: <http://moinhoparacalcario.blogspot.com.br/2012/05/qual-melhor-moinho-para-calcario-cal.html>; Acesso em ago.2017.

## 2.4 CALCINAÇÃO

A composição química e as propriedades do calcário e da cal estão ligadas a natureza das impurezas e ao grau de contaminação da pedra de origem, segundo Sobral (1995). As impurezas variam bastante, sendo normalmente encontradas como alumina e/ou sílica presentes no calcário por meio da argila, segundo Sobral (1995), porém outros silicatos de alumínio na forma de feldspatos e mica podem estar presentes. Materiais silicosos, com excessão da argila,

podem ocorrer no estado livre como areia, fragmentos de quartzo e cristal; e no estado combinado como feldspatos, mica e serpentina, porém é necessário avaliá-las, sob o aspecto econômico, para se verificar se elas têm impacto na utilidade da rocha. O processo de deposição do  $\text{CaCO}_3$  é acompanhado dessas impurezas ou ocorreram em estágios posteriores a deposição.

Existem limitações ao aproveitamento econômico dos calcários em função da presença de tais materiais, principalmente quando utilizados para fins nobres, conforme Sampaio e Almeida (2008). Em aplicações em que não se deseja cal de alta pureza, de acordo com Sobral (1995), podem ser raramente prejudiciais a presença de ferro na forma de limonita ( $\text{Fe}_2(\text{OH})_3$ ) e pirita ( $\text{FeS}_2$ ), ocasionalmente encontra-se no calcário, hematita, magnetita, marcasita e outras formas. Já compostos de fósforo e enxofre (geralmente sulfatos e fosfatos) são impurezas indesejáveis no calcário e cal.

A retirada de tais impurezas é feita através da calcinação do calcário, que é um processo de queima do carbonato de cálcio ( $\text{CaCO}_3$ ) com temperaturas que oscilam entre 900 – 1300 °C, com finalidade de se retirar os átomos de carbono e outras impurezas com ponto de fusão menores que o do cálcio, para a obtenção da cal virgem, que é o óxido de cálcio ( $\text{CaO}$ ). A reação que ocorre é: calcário + calor = cal virgem +  $\text{CO}_2$ . O óxido de cálcio ou cal virgem ( $\text{CaO}$ ) é um produto bastante reativo e quando entra em contato com água reage produzindo calor e hidróxido de cal, que é conhecido como cal hidratada ( $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ), que é uma base, largamente utilizada na neutralização de solos ácidos e em tratamento de águas. Depois de concluída esta etapa o produto ainda na sua forma bruta e “virgem” segue para seu ponto de estocagem para uma nova redução granulométrica de acordo com Votorantim (2017).

Segundo Sampaio e Almeida (2009), são utilizados dois tipos de fornos, rotativos verticais (Figura 5) e horizontais (Figura 6). Os verticais utilizam a gravidade a seu favor para queimar as rochas gradativamente, com insuflamento de ar embaixo e aspiração do ar quente em cima, esse dióxido de carbono quente é destinado ao processo de secagem da cal ou lavrado e utilizado para a produção do carbonato de cálcio precipitado.

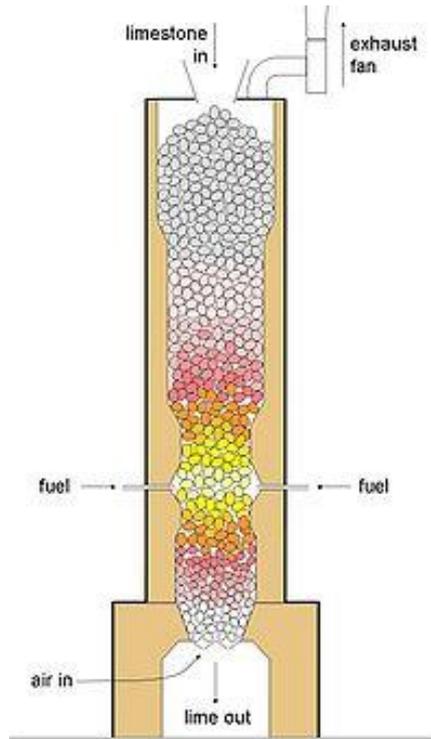


Figura 5. Forno de Calcinação vertical.

Disponível em: <https://pt.wikipedia.org/wiki/Calcina%C3%A7%C3%A3o>; Acesso em ago.2017

A Figura 6 exemplifica um forno rotativo, este é utilizado no processo de calcinação da cal, logo após a britagem a seco. Esse forno é composto por um motor elétrico acoplado a um redutor que aumenta o torque e diminui a rotação do forno. A parte externa é composta por uma carcaça de aço e a parte interna é composta por um material refratário, que é um material cerâmico, empregado para reter calor dentro do forno.



Figura 6. Forno de Calcinação rotativo.

Disponível em: <https://www.mecanicaindustrial.com.br/184-o-que-e-um-forno-rotativo/>; Acesso em ago.2017.

Combustível e comburente são injetados dentro do forno a fim de queimar o carbonato de cálcio ( $\text{CaCO}_3$ ), dessa forma há uma liberação de  $\text{CO}_2$ , transformando-o em óxido de cálcio, um composto (rocha) bastante reativo na presença de água. Esse gás quente ( $\text{CO}_2$ ), segundo Dallarosa (2011), é tratado em um lavador de  $\text{CO}_2$  e depois é usado para carbonatar a cal hidratada em indústrias que produzem o PCC (Carbonato de cálcio precipitado). Esse processo ocorre em um forno como o da Figura 7.

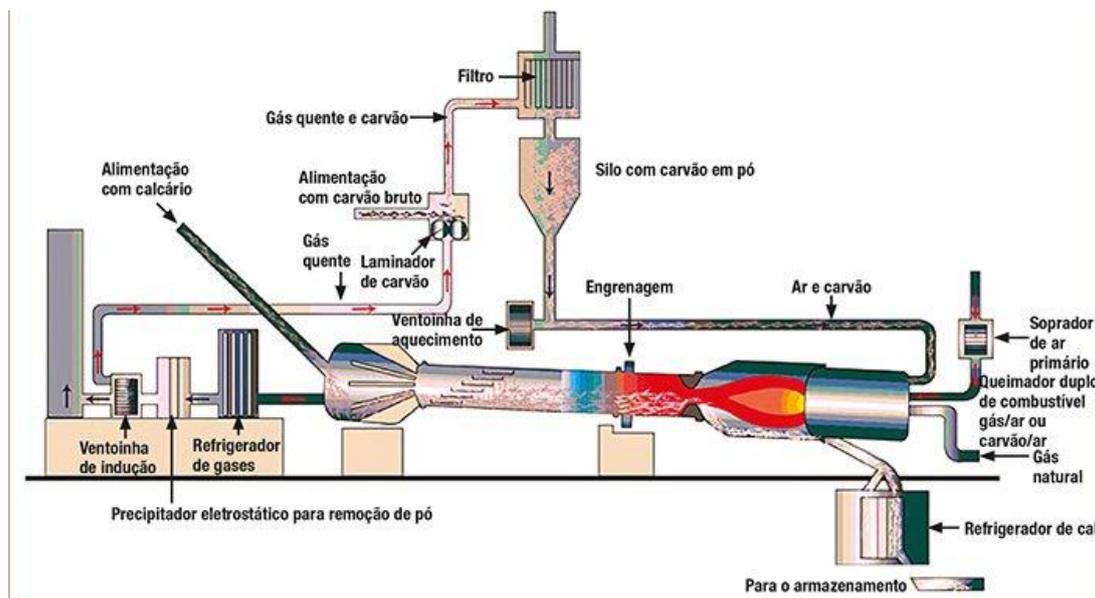


Figura 7. Forno rotativo com inclinação.

Disponível em: <http://revistaih.com.br/remodelando-revestimentos-refratarios-convencionais/>; Acesso em ago.2017

## 2.5 BRITAGEM – REDUÇÃO PARA PARTÍCULAS MENORES QUE $10 \mu\text{m}$

A cal virgem bruta estocada é transportada através de transportadoras de correias e seguem para os moinhos de cal virgem, onde haverá o beneficiamento, ou seja, a redução granulométrica  $10 \mu\text{m}$ . A seguir o material é estocado em silos com granulometria nas especificações adequadas para o processo de hidratação. Nessa etapa a cal britada é transferida para a hidratação por meio de transporte rodoviário, caso a indústria de PCC e etapas de britagem estiverem no mesmo local esse transporte rodoviário não existe.

Ao chegar na indústria, a hidratação é feita utilizando água e classificações que devem seguir especificações controladas pelas normas da ABNT, para produção do produto cal para determinada indústria, com tempo mínimo de cura para hidratação completa, para que se

garanta que nenhuma reação possa ocorrer por manuseio do produto pelo usuário final. Após essa etapa, a Cal está pronta para ensacamento e estocagem.

Do calcário se extrai, através dos processos mencionados acima, o carbonato de cálcio ( $\text{CaCO}_3$ ), que é utilizado em vários setores das indústrias como cal virgem ( $\text{CaO}$ ) ou cal hidratada ( $\text{Ca(OH)}_2$ ).

A norma ABNT (NBR 6473, 2003), prescreve os métodos para as determinações de umidade, perda ao fogo, sílica mais resíduo insolúvel, óxido de alumínio, óxido férrico, óxido de cálcio total, óxido de magnésio total, anidrido sulfúrico, anidrido carbônico, óxido de manganês total, anidrido fosfórico e óxido de cálcio disponível em cal virgem e cal hidratada.

Existem duas normas relacionadas a produção da Cal virgem:

- NM 249:2001- Determinação da granulometria da Cal virgem;
- ABNT NBR 6453:2003 Versão Corrigida:2003- Construção civil aplicação da Cal virgem.

## **2.6 BRITAGEM PÓS CALCINAÇÃO**

Nesse estágio as rochas se encontram na forma de óxido de cálcio. Muitas empresas exportam esse material para outras empresas que começam o processo da produção da cal hidratada a partir do óxido de cálcio ( $\text{CaO}$ ), que é a rocha após a calcinação (conhecida como cal virgem).

Segundo Dallarosa (2011), a empresa especializada em produção de cal hidratada, localizada em Mogi Guaçu – SP, compra a cal virgem de uma empresa de Minas Gerais, para assim produzir a cal hidratada na composição que precisa para fabricar papel.

## **2.7 HIDRATAÇÃO**

Nessa etapa, segundo Sampaio e Almeida (2009) a cal virgem ( $\text{CaO}$ ) é misturada em tanques que estão em constante agitação. A cal deve ficar o menor tempo possível para hidratá-la, para não haver o “afogamento da cal”, esse efeito acarreta em uma perda de qualidade da cal, assim como um tempo insuficiente acarreta em incompleta hidratação da cal. Essa reação exotérmica libera muita energia em forma de calor, que é usado para a secagem da cal.

A Figura 8 exemplifica um sistema de hidratação, vendido pela empresa fabricante Inovatronic. A rocha calcinada entra em um transportador horizontal que a conduz para o tanque agitador, todo esse processo é monitorado para que a quantidade de água injetada e a quantidade de cal hidratada que sai estejam nas quantidades corretas. Essa cal hidratada ( $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ) é chamada de “Slurry” ou leite de cal.

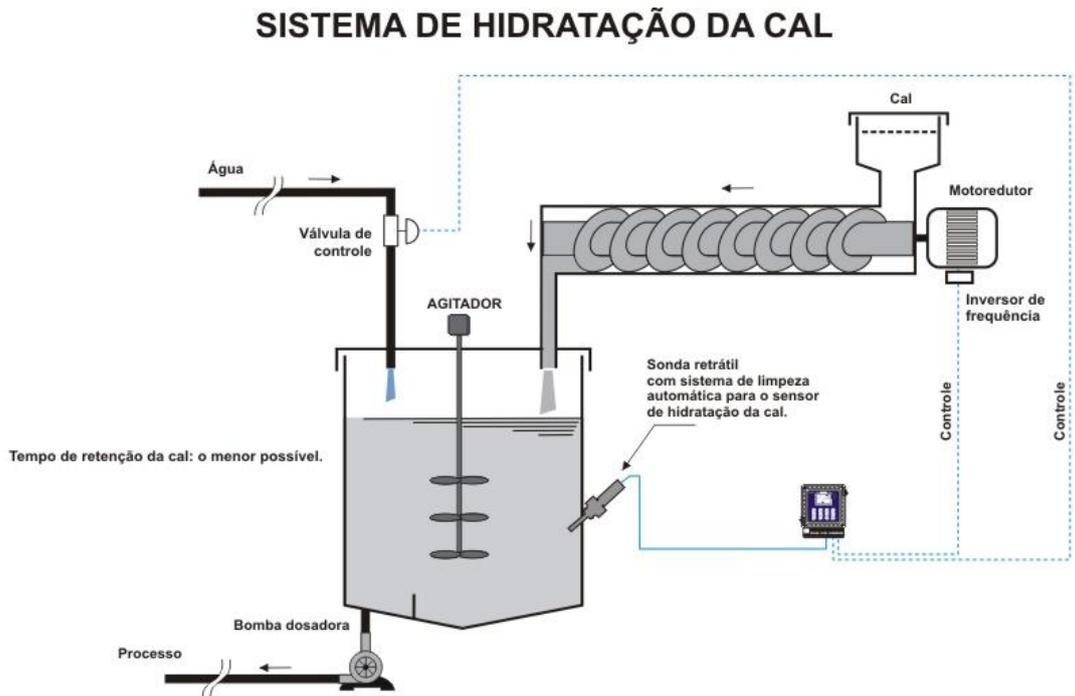


Figura 8. Hidratação da cal virgem (INOVATRONIC).

Disponível em: <http://www.inovatronic.com.br/html/Hidratacao%20da%20Cal.htm>; Acesso em ago. 2017.

Ainda segundo a Inovatronic, esse tempo de permanência da cal no agitador, depende se ela é dolomítica (presença de Mg em sua composição) ou cálcica (ausência de Mg em sua composição). Um dos usos da cal hidratada é no tratamento do caldo de cana para a produção do açúcar.

A Figura 9 ilustra todos os processos desde a extração da rocha calcária até a comercialização do produto final, no entanto, existem muitos processos diferentes da produção do carbonato de cálcio, uma vez que as rochas possuem composições diferentes em diferentes regiões que são extraídas. As indústrias se dividem na produção de GCC ou PCC que serão explicados no próximo capítulo.

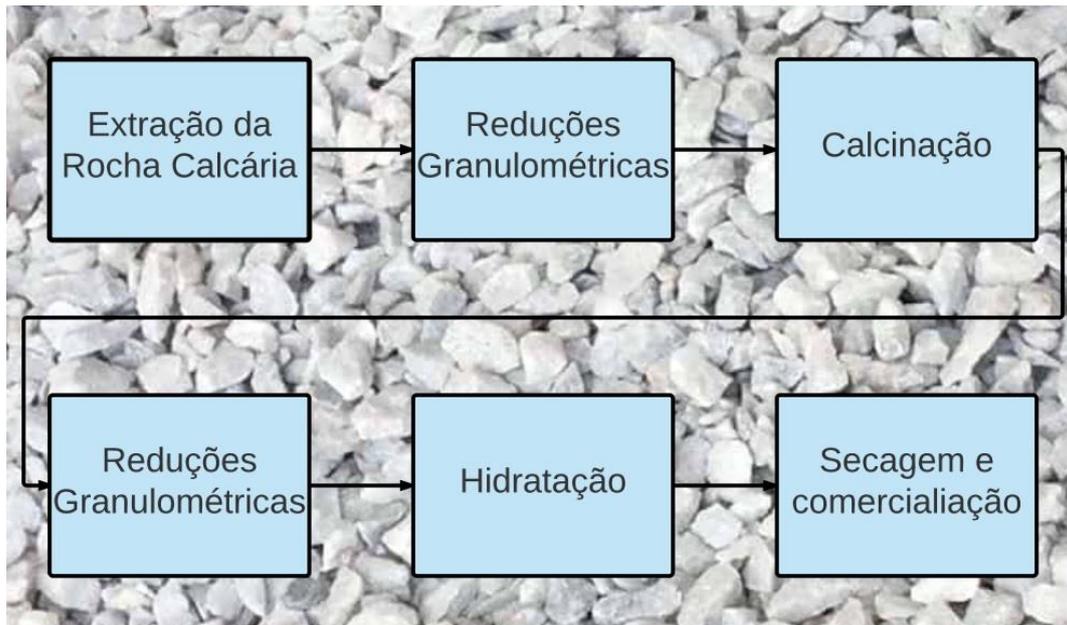


Figura 9. Fluxograma dos processos de produção do carbonato de cálcio.

## 2.8 MINERAÇÃO DO CARBONATO DE CÁLCIO PRECIPITADO (PCC)

De acordo com Sampaio e Almeida (2009), o carbonato de cálcio precipitado - PCC (*precipitated calcium carbonate*) é mais puro que o carbonato de cálcio natural – GCC (*grinding calcium carbonate*) pois em seu processo de fabricação passa por duas etapas (calcinação e hidratação) que permitem maior pureza, onde várias impurezas com ponto de fusão menores que os cálcios são queimadas, tornando-o mais puro. Surgiu na indústria devido a uma demanda de carbonato de cálcio ( $\text{CaCO}_3$ ) com uma pureza mais elevada para alguns setores da indústria que exigem esse produto mais puro, como a indústria farmacêutica e de construção civil.

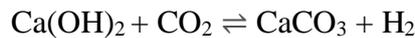
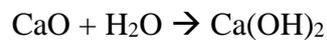
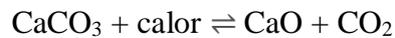
Na etapa de calcinação, a rocha calcária é levada a uma temperatura elevada, entre  $900^\circ\text{C}$  e  $1300^\circ\text{C}$ , temperatura essa que é função da quantidade de impurezas que a rocha possui, quanto mais impurezas possuir, maior a temperatura nos fornos de calcinação. Esse aumento de temperatura faz com que as impurezas da rocha queimem, produzindo óxido de cálcio ( $\text{CaO}$ ) e liberando ( $\text{CO}_2$ ), este  $\text{CO}_2$  será utilizado posteriormente como insumo para carbonatar o óxido de cálcio [3] no intuito de produzir carbonato de cálcio ( $\text{CaCO}_3$ ), agora mais puro, que é um sal.

Conforme Sampaio e Almeida (2009) explicam, há uma perda de aproximadamente 44% da massa total da rocha calcária retirada da natureza, perda essa que pode chegar a 48% se a rocha for dolomítica. Em outras palavras, para cada 2 toneladas de rocha que se extrai da natureza, apenas 1 tonelada é, efetivamente, o produto final.

No processo de hidratação da cal, o óxido de cálcio (CaO), que é uma molécula muito reativa e instável, reage com água e forma a cal hidratada, uma molécula estável. Essa reação é do tipo exotérmica, ou seja, libera calor ao produzir a cal hidratada. Essa cal hidratada precisa passar por um processo de secagem para assim ser ensacada e destinada à outras indústrias, que necessitam de carbonato de cálcio mais puro.

Por fim, o carbonato de cálcio precipitado é produzido através do processo de carbonatação da cal hidratada [3] com o dióxido de carbono que foi produzido na calcinação do CaCO<sub>3</sub> [1].

As reações [1], [2] e [3] descrevem, nessa ordem, a produção do PCC:



Esse carbonato de cálcio – PCC é mais utilizado pela indústria papeleira. Em geral, as indústrias de PCC estão localizadas nas próprias fábricas de papéis para diminuir custos com a secagem da cal hidratada [2]. As vantagens do PCC em relação ao GCC são a elevada alvura e a ausência de impurezas como ferro e quartzo, entre outras.

A Figura 10 exemplifica o processo de produção do carbonato de cálcio precipitado (PCC), em uma indústria especializada em produção de papel, desde o recebimento da cal virgem, com granulometria menor que 1 polegada.

## Processo Industrial - PCC

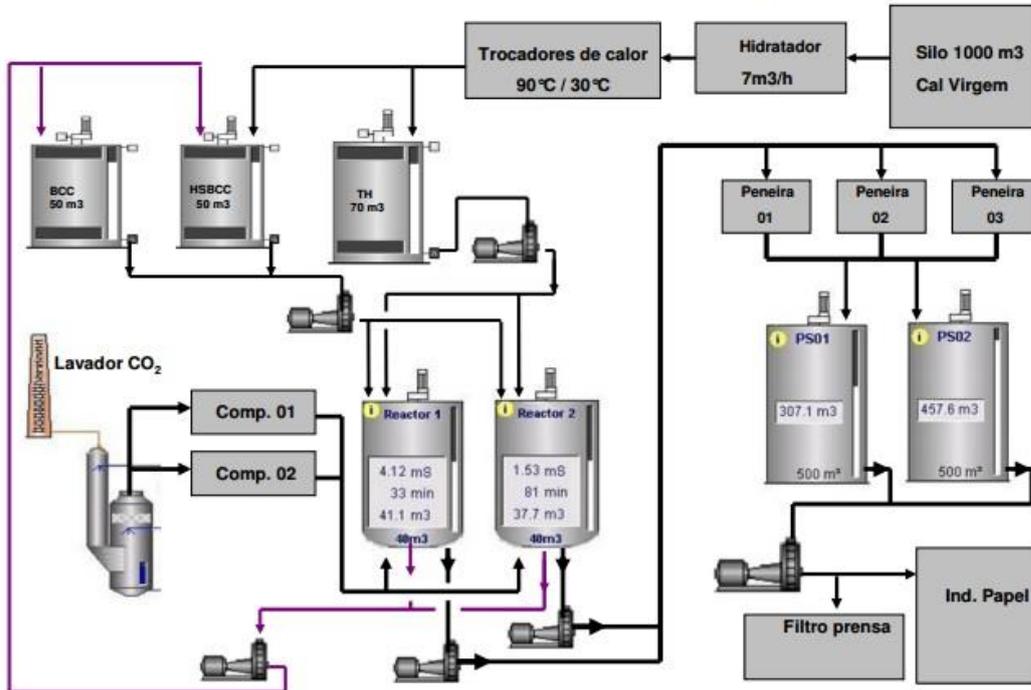


Figura 10. Processo industrial do carbonato de cálcio precipitado (DALLAROSA, 2011)

A Figura 11 ilustra pedras de Cal virgem com 1'' de diâmetro. Pedras com essas características são utilizadas no processo industrial de produção do PCC.



Figura 11. Pedra de Cal virgem com 1'' de diâmetro médio (DALLAROSA, 2011)

Segundo Dallarosa (2011) a hidratação da cal, em Mogi Guaçu ocorre em um tanque hidratador que recebe cal virgem, água, óxido de magnésio, ácido cítrico, com agitação

constante, logo após o produto é bombeado através de motobombas por trocadores de calor para perder calor para o ambiente até os tanques que possuem capacidade 7m<sup>3</sup>/h. Essa cal hidratada é chamada de “Slurry”, o slurry é armazenado nos tanques de espera, conhecidos como tanques de armazenagem do produto hidratado.

Essa cal hidratada vai reagir com dióxido de carbono para produzir o carbonato de cálcio, mas esse CO<sub>2</sub> precisa passar antes por um processo de limpeza, para rejeitar as impurezas. O gás CO<sub>2</sub> é inserido no processo, junto ao slurry com concentrações que variam de 18 a 21%, quanto maior a concentração do gás, mais rápida a reação. O gás vem com temperatura de aproximadamente 195°C, temperatura muito alta que deve ser abaixada para aproximadamente 40 °C em trocadores de calor à água.

A Figura 12 mostra a cal virgem (A), a cal moída (B) e a cal hidratada (C) da empresa produtora.

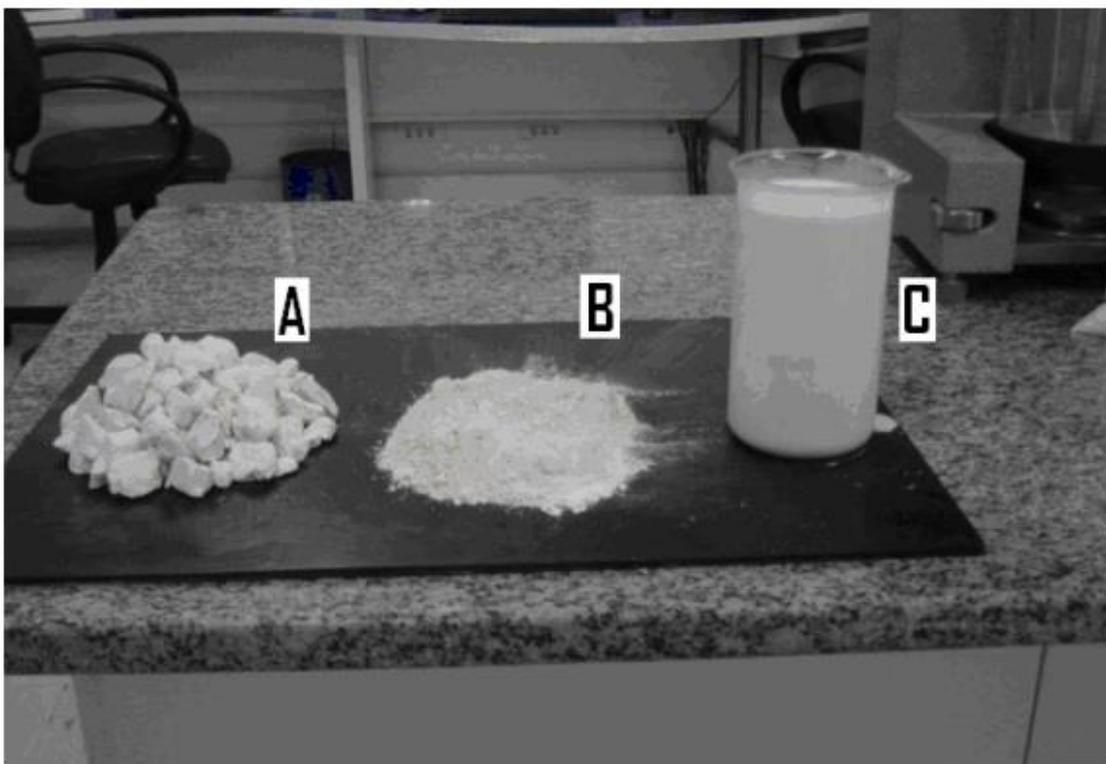


Figura 12. Crumbles, Cal moído e “Slurry” (DALLAROSA, 2011).

## 2.9 MINERAÇÃO DO CARBONATO DE CÁLCIO NATURAL (GCC)

De acordo com Sampaio e Almeida (2009), o carbonato de cálcio natural – GCC (*grinding calcium carbonate*), também conhecido como carbonato de cálcio moído, é um produto que se difere do PCC pois não passa pelas etapas de calcinação e hidratação e por isso contém mais impurezas. É um produto com granulometria ultrafina ( $< 10 \mu\text{m}$ ) mais utilizado em produtos que não requerem alta pureza como fabricação de gesso, tintas, entre outros.

Primeiramente se faz uma caracterização das rochas carbonatadas, logo em seguida são aplicadas etapas de moagem para classificar esse calcário moído - GCC.

Segundo Sampaio e Almeida (2009), a indústria papeleira, utiliza duas faixas granulométricas aceitáveis. Uma ultrafina, com partículas de granulometria  $< 10 \mu\text{m}$  e outra grossa, com particulados de granulometria entre 10 e 45  $\mu\text{m}$ . O primeiro e o segundo casos podem ser realizados em moinhos de rolos ou de bolas, estes mais precisos que os de rolos, mas pode-se usar somente o de rolos para obter uma granulometria ultrafina, mas o particulado deverá passar pelo moinho mais de uma vez, diminuindo a capacidade do sistema.

Na moagem ultrafina há, em alguns casos, a necessidade do uso de dispersantes químicos, para garantir a fluidez da polpa, mas isso causa uma contaminação do produto final, devendo, então, ser avaliado o efeito do reagente na aplicação do produto final.

Dallarosa (2011) fez um estudo em duas fábricas produtoras de cal nas duas formas, GCC e PCC, uma localizada em Ponta Grossa – PR, especializada em produção de GCC e outra em Mogi Guaçu – SP, especializada na produção de PCC.

A unidade de Ponta Grossa importa da Turquia a cal virgem com granulometria de 6 polegadas, a cal passa pelo britador que reduz o seu tamanho para 1 polegada, vai para os silos através de roscas helicoidais, passa pelo moinho de rolos, segue para outro silo, depois passa em três moinhos de bolas de aço, que de acordo com o tamanho médio das bolas, classifica a cal em produtos diferentes. Quanto menor o diâmetro das esferas de zircônia que ficam dentro dos moinhos de bolas, menor será a granulometria final do produto, tornando-o mais caro. O moinho de bolas 01 possui mini esferas de zircônia de 1 a 1,6mm. Os moinhos 02 e 03 são idênticos e possuem esferas de zircônia de 0,6mm a 1mm, portanto, os moinhos de bolas 2 e 3 deixam o produto final com menor granulometria.

## Processo Industrial - GCC

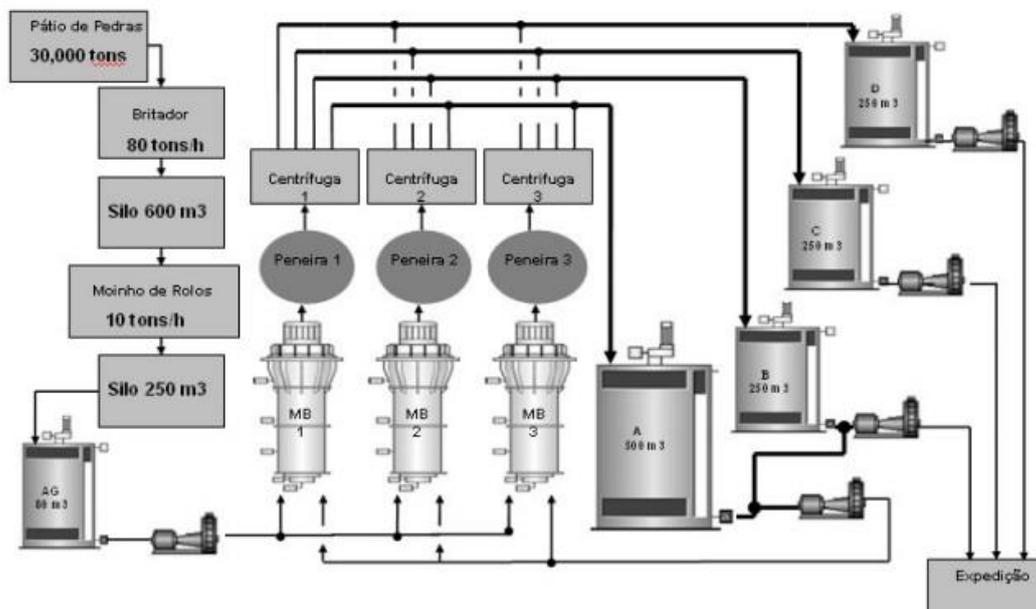


Figura 13. Processos de produção do GCC (DALLAROSA, 2011).

## 2.10 TIPOS DE BRITADORES UTILIZADOS NOS PROCESSOS

Os minerais são, em maioria, materiais cristalinos, onde os átomos estão organizados tridimensionalmente. A configuração dos átomos é determinada pelo tamanho e tipos de ligações físicas e químicas que os mantêm unidos na rede cristalina dos minerais. Essas ligações interatômicas são eficientes à pequena distância, e podem ser quebradas se tensionadas por forças externas, segundo Figueira, 2004.

Os equipamentos de britagem e moagem se utilizam de diferentes mecanismos para realizar a quebra da rede cristalina. Em geral os três mecanismos de fragmentação principais listados a seguir estão sempre presentes, prevalecendo o efeito de um deles sobre os demais.

### 2.10.1 CHOQUE E IMPACTO

No mecanismo de choque e impacto a fratura ocorre quando forças são aplicadas de forma rápida e em intensidade muito superior à resistência das partículas. Faz uso, em geral, da energia cinética de corpos em movimentos circulares ou cadentes. Resulta deste tipo de quebra um grande número de partículas em uma vasta faixa granulométrica. Este é o mecanismo mais

eficiente em termos de utilização da energia, mas, normalmente sua aplicação é mais restrita aos materiais menos abrasivos de acordo com Valadão, 2007.

### **2.10.2 COMPRESSÃO OU ESMAGAMENTO**

O rompimento ocorre quando forças de compressão, de baixa intensidade, são aplicadas de maneira lenta e progressiva, permitindo-se, com o aparecimento da fratura, o alívio do esforço, sendo as forças de compressão aplicadas superiores a resistência dos blocos rochosos ou partículas. Resulta deste mecanismo um número reduzido de fragmentos homogêneos de tamanho intermediário. É o mecanismo mais comum, desde blocos de ordem de metros até partículas micrométricas. É observado em britadores de mandíbula, britadores giratórios e cônicos. Nos moinhos resolventes, assim como nos moinhos Raymond, o mecanismo está associado à compressão das partículas entre corpos moedores, compressão entre partículas menores ou contra um cilindro interno. Tal tecnologia de moagem é usada no processo de obtenção do GCC.

### **2.10.3 ABRASÃO POR CISALHAMENTO**

As forças aplicadas não são suficientes para provocar fraturas ao longo de toda a partícula, segundo Valadão, 2007. Prevalece uma concentração de esforços (tensão localizada) na área periférica, principalmente na superfície de contato das partículas, que provoca o aparecimento de pequenas fraturas. Resulta deste tipo de quebra uma distribuição granulométrica onde as partículas muito pequenas convivem com partículas de tamanho próximo ao original as quais vão tendo seus diâmetros reduzidos gradativamente com o tempo. Esse tipo de quebra é geralmente provocado por atrito, quando partículas maiores são aprisionadas entre superfícies dotadas de movimento. Na maioria das vezes, o movimento entre as superfícies é contrário ao movimento das próprias partículas. Este mecanismo leva a um consumo alto de energia e a uma produção alta de superfinos.

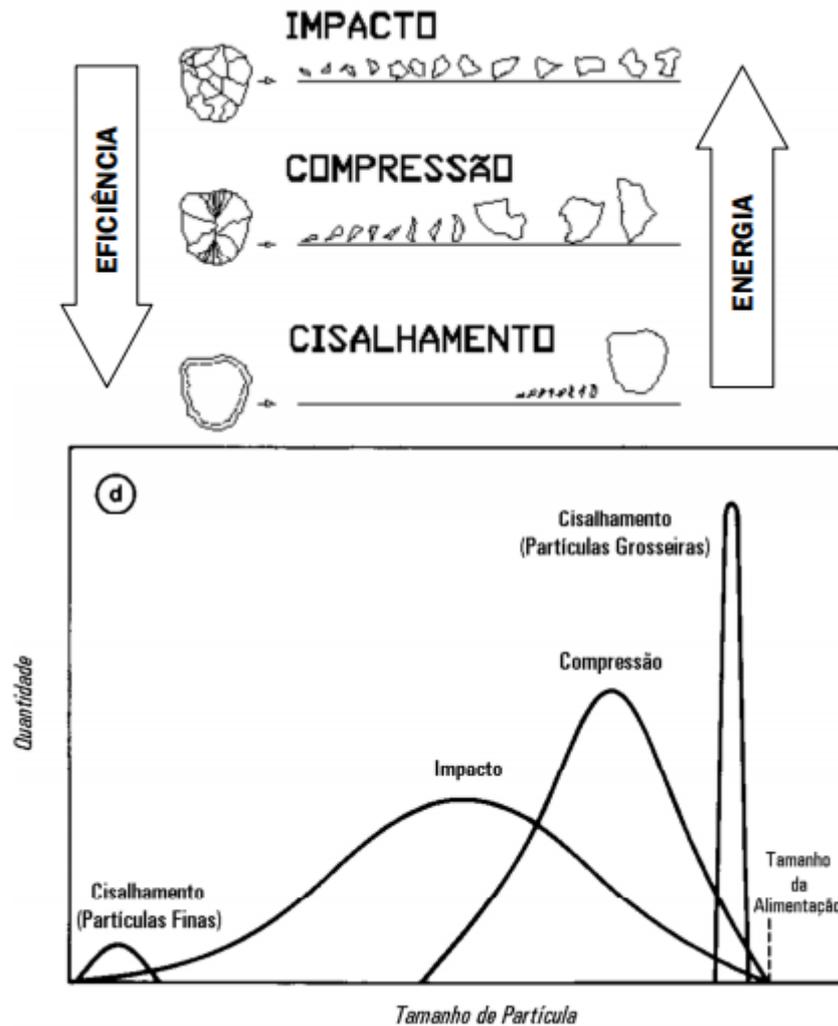


Figura 14. Distribuição granulométrica das partículas de acordo com o mecanismo de fragmentação utilizado (CARVALHO, 2012).

## 2.11 EQUIPAMENTOS DE BRITAGEM

Para a correta aplicação do britador, algumas características para o projeto de britagem devem ser levadas em conta, além das particularidades do material processado citadas anteriormente. A partir de alguns aspectos técnicos, é possível limitar e definir qual o tipo de equipamento a ser utilizado no processo. Dentre esses fatores, destacam-se parâmetros mecânicos e operacionais intrínsecos de cada tipo de equipamento, como as forças presentes, a energia necessária, o desgaste dos componentes, a disponibilidade física e a taxa de produção máxima

A seguir serão tratados os equipamentos atualmente utilizados nas operações de britagem e as suas características.

### 2.11.1 BRITADOR DE MANDÍBULAS

São empregados principalmente como britadores primários, tendo como função produzir material que será conduzido por transportador de correia aos estágios subsequentes de britagem ou processamento.

A britagem ocorre entre uma superfície fixa, chamada mandíbula, e outra móvel, sendo esta integrada a um volante, o que fornece o movimento de vai e vem entre elas. Desta maneira o bloco alimentado na boca do britador vai descendo entre as mandíbulas enquanto recebe a compressão responsável pela fragmentação (FIGUEIRA, 2004). O produto é escoado por gravidade.

Os britadores de mandíbulas são classificados basicamente em britadores de um ou dois eixos (tipo Blake) de acordo com o mecanismo de acionamento da mandíbula móvel. No britador de um eixo a mandíbula móvel faz um movimento puro de vai-e-vem em direção à mandíbula fixa, enquanto no britador de dois eixos a mandíbula faz um movimento elíptico ou pendular, combinando um movimento excêntrico em cima e oscilatório em baixo dando ao queixo movimento de “mastigação” por toda a superfície de britagem.

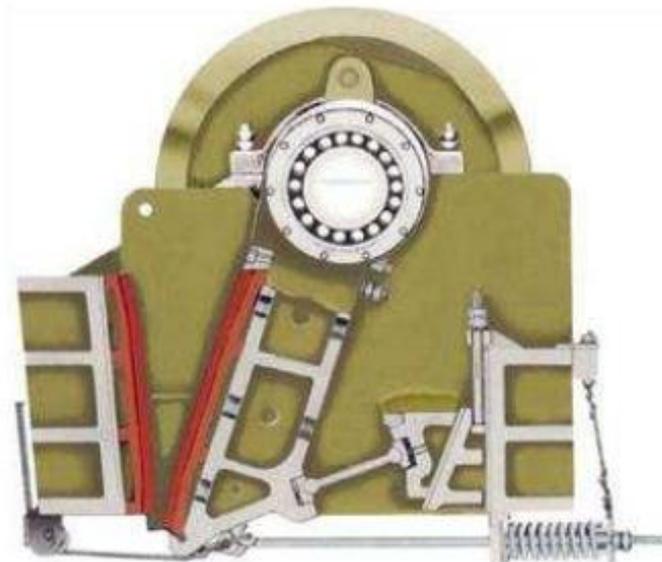


Figura 15. Britador de Mandíbulas de um Eixo (METSO, 2005).

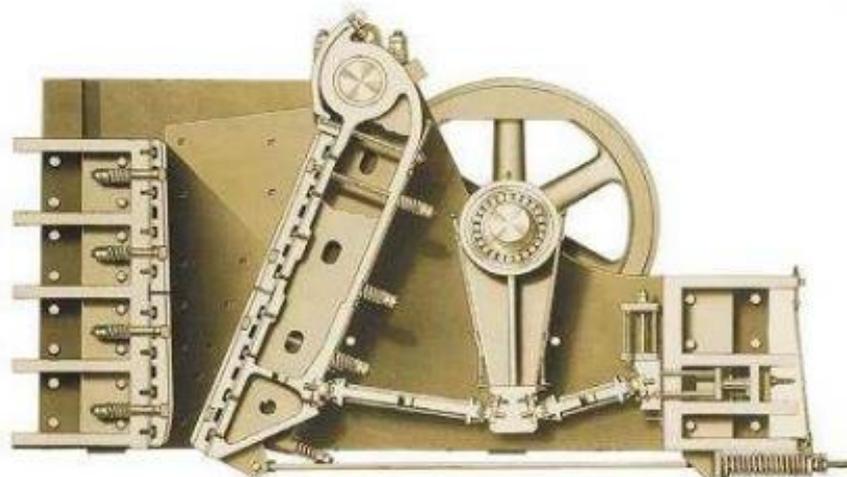


Figura 16. Britador de Mandíbula de dois eixos (METSO, 2005).

Devido ao movimento de “mastigação”, o britador de um eixo tem melhor capacidade de entrada na alimentação de material que o britador de dois eixos de tamanho correspondente, segundo Metso, 2005. Em termos de custos de capital, britadores de dois eixos são cerca de 50% mais elevados que os de um eixo, sendo indicados para materiais mais abrasivos e de difícil fragmentação.

Possuem como desvantagem a largura relativamente pequena se comparada com o círculo de saída de uma máquina giratória, limitando assim a capacidade. Eventualmente as mandíbulas deveram ser trocadas devido ao desgaste.

### **2.11.2 BRITADOR DE IMPACTO**

Neste tipo de britador, a fragmentação se dá por impacto. O equipamento é constituído de uma carcaça de chapas de aço que contém um conjunto de eixo e rotor. Por meio do movimento das barras ou martelos (de 500 até 3.000 rpm) conectados ao rotor, ilustrados pela Figura 17, parte da energia cinética é transferida para o material, projetando-o sobre um anteparo ( placas fixas de impacto) onde ocorre a fragmentação.

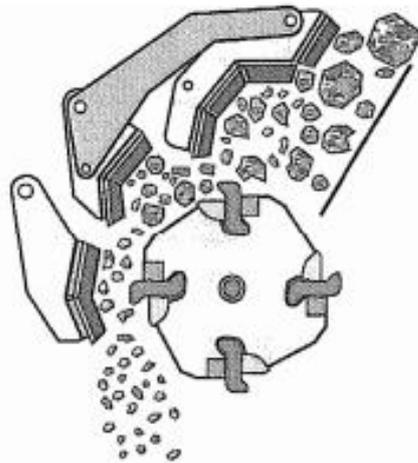


Figura 17. Desenho esquemático de um impactador (METSO,2005)

Apresentam altas taxas de redução e são geralmente utilizados em aplicações não-abrasivas e onde a produção de finos não representa problema. Podem ser empregados para britagem seletiva, um método que libera os minerais duros do material estéril. Dentre todos os tipos de britadores primários, o impactador é o que gera o produto com geometria mais regular, se aproximando da forma cúbica. Uma característica especial deste tipo de britador é a possibilidade de inclusão de um sistema de proteção da câmara de britagem contra corpos metálicos estranhos. As desvantagens do uso desse equipamento são o elevado custo de manutenção e o grande desgaste, não sendo aconselhável seu uso, no caso de rochas abrasivas e de materiais com valor da sílica equivalente maior que 15%. Estes equipamentos são escolhidos para britagem primária, onde se deseja uma alta razão de redução e alta percentagem de finos segundo Figueira, 2004. A seguir serão apresentados os dois tipos principais de britadores de impacto, o britador de eixo horizontal (convencional) e o de eixo vertical.

### **2.11.3 BRITADOR DE IMPACTO COM EIXO HORIZONTAL**

Os impactadores com eixo horizontal (HSI - Horizontal Shaft Impact) se apresentam em muitos formatos e tamanhos, desde britadores primários de alta capacidade até máquinas especiais projetadas para britar materiais como escória. O material alimentado na máquina é submetido a altíssimos impactos causados por martelos ou barras em rápido movimento montados no rotor. As partículas resultantes são então adicionalmente impactadas no interior da máquina. Elas colidem com peças do britador e umas com as outras resultando em melhor

formato do produto, de acordo com Metso, 2005. Uma ilustração do impactor HSI pode ser vista na Figura 18.

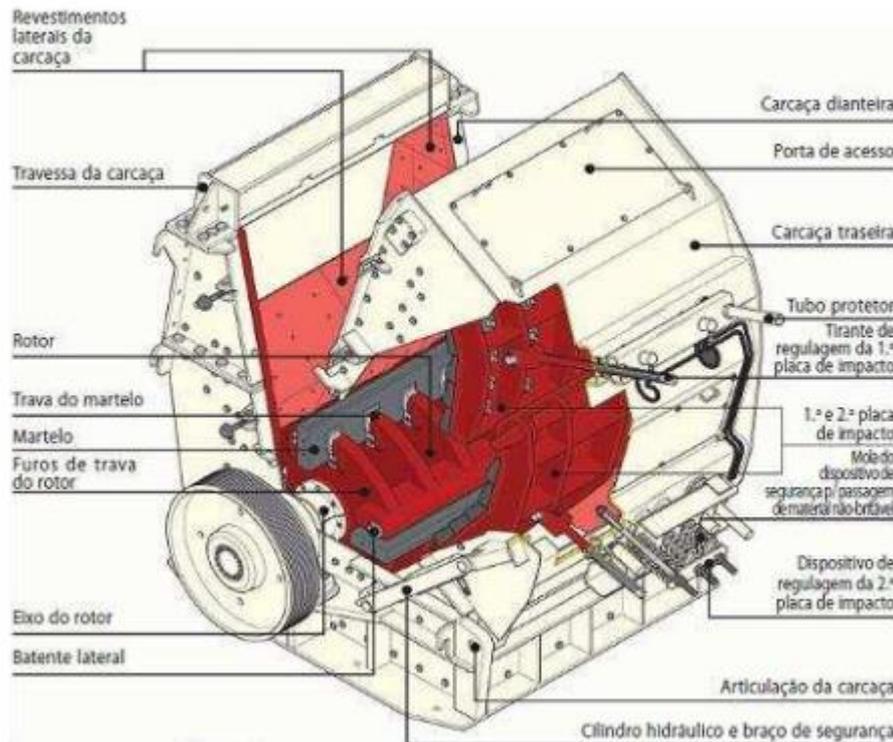


Figura 18. Impactor de rolos horizontais (METSO, 2005)

#### 2.11.4 BRITADOR DE IMPACTO DE EIXO VERTICAL

O britador de impacto vertical (VSI - Vertical Shaft Impact) é conhecido como o equipamento capaz de produzir modificações nas partículas, dando-lhes formato cúbico ou arredondado. Essa forma das partículas é atribuída aos mecanismos que ocorrem no rotor e na câmara de britagem do britador: impacto, abrasão e atrição. Uma parte do material é alimentada pelo centro do rotor, sendo acelerada a altas velocidades e saindo do rotor por aberturas periféricas, enquanto a outra parte do material passa por fora do rotor, na forma de cascata, segundo Figueira, 2004 e como ilustrado na Figura 19. A britagem ocorre quando o material em alta velocidade colide contra o revestimento da carcaça estacionária externa e também quando as partículas colidem entre si.



Figura 19. Desenho esquemático do percurso do material na câmara de britagem de um Britador de Impacto Vertical (METSO, 2005).

As máquinas VSI são na maioria dos casos do tipo autógenas, impactando o material saído do rotor contra a parede revestida do próprio mineral, minimizando os custos relacionados com o desgaste. São também utilizados revestimentos metálicos para aplicações em moagem de materiais de baixa abrasividade, que proporcionam maiores taxas de redução e menor consumo energético quando comparados com os britadores autógenos como consta em Metso, 2005.

### 2.11.5 BRITADORES DE MARTELOS

Os britadores de martelos foram desenvolvidos para o esmagamento de material grosseiro, para as indústrias de cimento, gesso e calcário. Eles estão disponíveis como britadores de martelo de impacto, britadores de martelo de um eixo e britadores de martelo de dois eixos. A Figura 20 a seguir mostra alguns modelos.



Figura 20. Britadores de Martelos de 1 e 2 eixos (THYSSENKRUPP, 2003).

A fragmentação do britador de martelos ocorre através da rotação dos martelos entre o rotor e a bigorna, segundo Varela, 2011. O tamanho do produto final pode ser determinado pela abertura da grelha posicionada na região de descarga do material, segundo Thyssenkrupp, 2003.

Britadores de martelo de dois eixos são especialmente adequados para a redução de material com alta umidade. Para isto, a geometria da câmara de britagem, a bigorna e a grelha necessitam de adaptações para se evitar problemas com obstrução/entupimento, conforme citado em Varela, 2011.

### 2.11.6 BRITADOR DE ROLO DENTADO

Consiste basicamente de um rolo dentado que gira de encontro a uma placa fixa ou contra outro rolo dentado. O movimento giratório do rolo provoca a compressão e cisalhamento do material entre os dentes e a placa fixada à câmara. A Figura 21 mostra esquematicamente um britador de um rolo dentado.

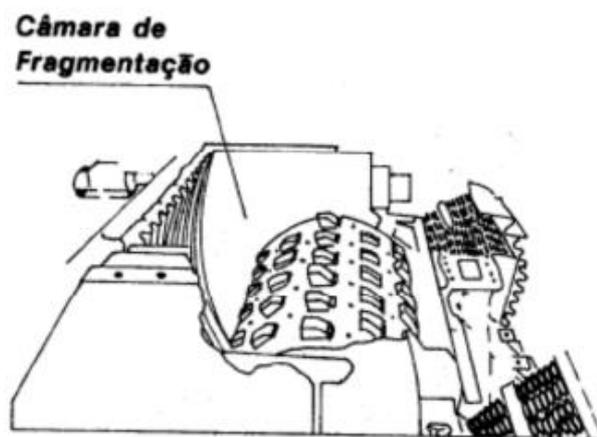


Figura 21. Britador de rolo dentado (FIGUEIRA, 2004).

O britador de duplo rolo distingue-se do britador tipo sizer, principalmente pela sua robustez e volante de inércia que auxilia na energia transferida para o processo de britagem em um rolo fixo e outro móvel. Este tipo de britador possui rolos com diâmetros maiores, o sentido de rotação dos rolos é exclusivamente na direção central e a velocidade de rotação é relativamente maior quando comparada com as utilizadas no britador sizer. Tem emprego limitado devido ao grande desgaste dos dentes, por ser sensível à abrasão, conforme Varela, 2011.

É aconselhável sua aplicação para rochas de fácil fragmentação, materiais friáveis e pouco abrasivos (como carvão, calcário, caulim, fosfatos) e também para britagens móveis, dada as pequenas dimensões do equipamento. Possui alta tolerância à umidade da alimentação, sendo na britagem primária um dos equipamentos que produz menos finos, perdendo apenas para o sizer, de acordo com Figueira, 2004.

### 2.11.7 MOINHOS DE BOLAS

São moinhos rotativos que utilizam esferas de aço fundido ou forjado ou ferro fundido como meio moedor podendo ser utilizado em via seca ou úmida, sendo a maior parte de suas aplicações em circuito fechado com algum tipo de classificador. Na Figura 22 são mostrados moinhos de bolas com diferentes arranjos de descarga.

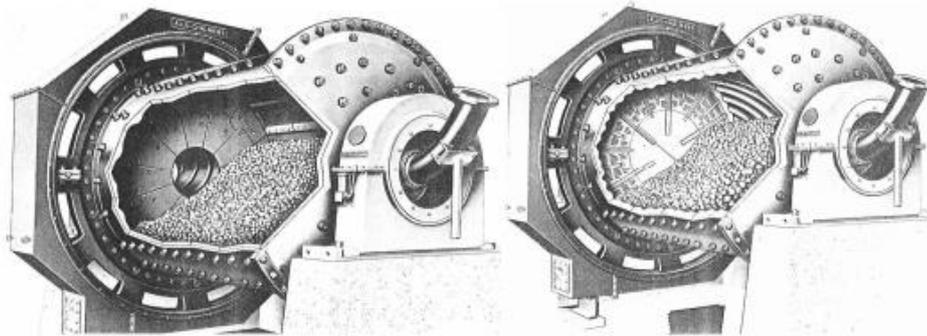


Figura 22. Moinhos de Bolas - arranjos de descarga por Overflow e Diafragma, respectivamente (ROWLAND, 1978).

O termo moinho de bolas é restrito àqueles que têm apenas uma câmara de moagem e em que a relação L/D (comprimento/diâmetro) for menor que 2, como consta em Metso, 2005. O moinho de bolas em regime de catarata pode ser alimentado com material grosso (3 a 4 mm) e geralmente trabalha em circuito fechado com classificador. Já o moinho em regime de cascata deve ter uma alimentação mais fina, constituída pelo produto da moagem primária feita num moinho de barras ou de bolas em regime de catarata e é utilizado em moagem secundária com a finalidade de fragmentar o minério na malha requerida ao processo subsequente, segundo Figueira, 2004.

O tamanho dos corpos moedores é um dos principais fatores que afetam a eficiência e a capacidade do moinho. O tamanho próprio das bolas a serem adicionadas num moinho em operação deve ser adequado para quebrar as maiores partículas da alimentação. Entretanto, este tamanho não pode ser muito grande, pois o número de contatos de quebra será reduzido assim

como a capacidade do moinho, segundo Figueira, 2004. Os tamanhos das bolas são selecionados a partir do tamanho da alimentação e do  $Wi$  do material. Como regra grosseira, pode-se adotar o tamanho da maior bola como 4 a 5 vezes o tamanho da alimentação.

O desgaste dos corpos moedores com o uso faz com que, ao final de algum tempo, se tenha uma distribuição contínua de diâmetros, o que é denominado carga de equilíbrio ou sazoadada. As bolas têm maior área superficial por unidade de peso do que as barras, sendo mais adequadas à moagem fina. Os moinhos de bolas são capazes de fornecer produtos desde 80% passante na malha de 35 mesh até passantes em malhas de poucos microns, como consta em Metso, 2005.

A alimentação deve ser preparada previamente por moinhos de barras ou britadores (terciários ou quaternários), sendo a alimentação ideal de um moinho de bolas de 80% passante em malha de 14 a 20 mesh, sendo recomendável que não exceda 80% passante de  $3/8$  " a  $1/2$ ". Na Tabela 1 são especificadas as principais características dos moinhos de bolas.

Tabela 1. Moinhos de bolas- Tipos e características (CARVALHO, 2012)

Principais características dos Moinhos de Bolas			
Arranjo de descarga	Overflow	Diafragma	Compartimentado
Processo de moagem	Somente via úmida	Via seca ou úmida	Via seca ou úmida
Circuito	Usualmente fechado	Fechado	Fechado ou aberto
Produto típico	Fino - 200 mesh	Intermediário (via úmida) 65 a 100 mesh Fino (via seca) 325 mesh	Fino - 150 a 325 mesh
Tamanho máximo da alimentação	10 a 14 mesh	<1/2"	< 1/2"
Relação L/D	1:1 a 1,5:1	1:1 a 1,5:1	Circ. Aberto 3,5:1 a 5:1 Circ.Fechado 2,5:1 a 3,5:1
Velocidade típica- (%) da veloc. crítica	65 a 70%	68 a 70%	Via úmida 65 a 75% Via seca 70 a 78%
Volume de carga	35 a 40% (preferível 35%)	29 a 40%	30 a 40%

São listados na Tabela 2 alguns dos principais tipos de britadores e um resumo de suas respectivas características. De acordo com o tipo de material e os pré-requisitos de um projeto de britagem eficiente, é escolhido um britador ideal ou uma combinação destes.

Tabela 2. Principais tipos de britadores e suas características (CARVALHO, 2012).

Tipo de britador	Mandíbulas	Giratório	Cônico	Impacto	Martelos	Sizer	Rolos Dentados
Serviço	Britagem 1ª e 2ª	Britagem 1ª	Britagem 2ª 3ª e 4ª	Britagem 1ª, 2ª, 3ª e 4ª	Britagem 1ª, 2ª e 3ª	Britagem 1ª, 2ª e 3ª	Britagem 1ª e 2ª
Grau de Redução	5:1 (4:1 a 9:1)	8:1 3:1 a 10:1	3:1 a 7:1	6:1 a 40:1	20:1 a 100:1	3:1 a 6:1	2:1 a 6:1
Capacidade de Processamento (t/h)	Baixa a Média (até 1300)	Média a alta ( até 10000)	Baixa e média (até 2400)	Baixa e média (até 2400)	Baixa e média (até 2800)	Média a alta ( até 10000)	Média a alta ( até 12000)
Tamanho máx. da alimentação (mm)	Grandes tamanhos (até 1500)	Grandes tamanhos (até 1600)	até 500	até 1500	até 1500	até 2000	Limitado a distância entre rolos (até 2500)
Granulometria do Produto	Poucos finos. Top size alto p/ lamelares	Poucos finos. Top size menor que mandíbulas	Distrib. Granulométrica uniforme, formato cúbico	Muitos finos, formato cúbico ou arredondado.	Muitos finos e formas cúbicas	Poucos grossos e teor de fibras menor quando comparado c/ outros equip	Tamanho médio a fino ( baixa porcentagem) uniforme.
Aplicação	Duro e abrasivo, c/ sílica <30% e umidade <10%. Pouco indicado p/ minerais coesivos e c/ tendência a produzir partículas lamelares.	Abrasivo umidade <5% e c/ tendência a produzir partículas lamelares. Pouco indicado p/ minerais coesivos.	Duro e abrasivo e p/ umidade < 8%. Pouco indicado p/ minerais coesivos.	Abrasivo c/ sílica+ óx. Metálicos < 15% umidade <8%, alto teor de argila, c/ tendência a produzir partículas lamelares. Limitado a rochas frágeis ou elásticas.	Dureza baixa a moderada, pouco abrasivos c/ sílica <3-8% e umidade <15-20%.	Dureza média, c/ sílica <10% p/ umidade <30% e minerais coesivos e pegajosos.	Dureza baixa e média, pouco abrasivo c/ sílica <10%, umidade <30%, minerais coesivos, c/ tendência a produzir partículas lamelares
Resist. a Compressão (Mpa)	< 500	< 400	< 400	< 300	< 200	< 130	< 180

## 3 PROJETO CONCEITUAL

*Este capítulo apresenta uma análise conceitual da manutenção de britadores de impacto de eixo horizontal baseado nos principais problemas que levam à falha dos componentes, suas causas bem como soluções comumente adotadas. Trata também da análise energética para obtenção das forças e proposição de conceito.*

### 3.1 DESGASTE EROSIVO

Kallel, Zouch, Antar, Bahri e Elleuch realizaram um estudo em um martelo feito de ferro fundido ao cromo, utilizado para triturar rochas barita, com o intuito de identificar os mecanismos de falha do martelo, devido ao seu alto desgaste. Esse martelo, feito de aço ao cromo, Tabela 11, pode se desgastar prematuramente, podendo ser trocado semanalmente devido à alta taxa de desgaste.

Tabela 3. Propriedades mecânicas do martelo feito de ferro fundido branco ao cromo (KALLEL, ZOUCHE, ANTAR, BAHRI, ELLEUCH, 2017).

Módulo de elasticidade	$E$	172 GPa
Limite de ruptura	$\sigma_r$	2.460 MPa
Limite de escoamento	$\sigma_y$	2.051 MPa
Taxa de encruamento	$e_r$	8%

A Figura 23 (a) representa o processo de trituração da rocha barita, (b) é uma foto real de um britador de impacto onde é possível ver os martelos e o rotor em que eles são encaixados, (c) ilustra o rotor sem os martelos, possibilitando a visualização do eixo que suporta os martelos.

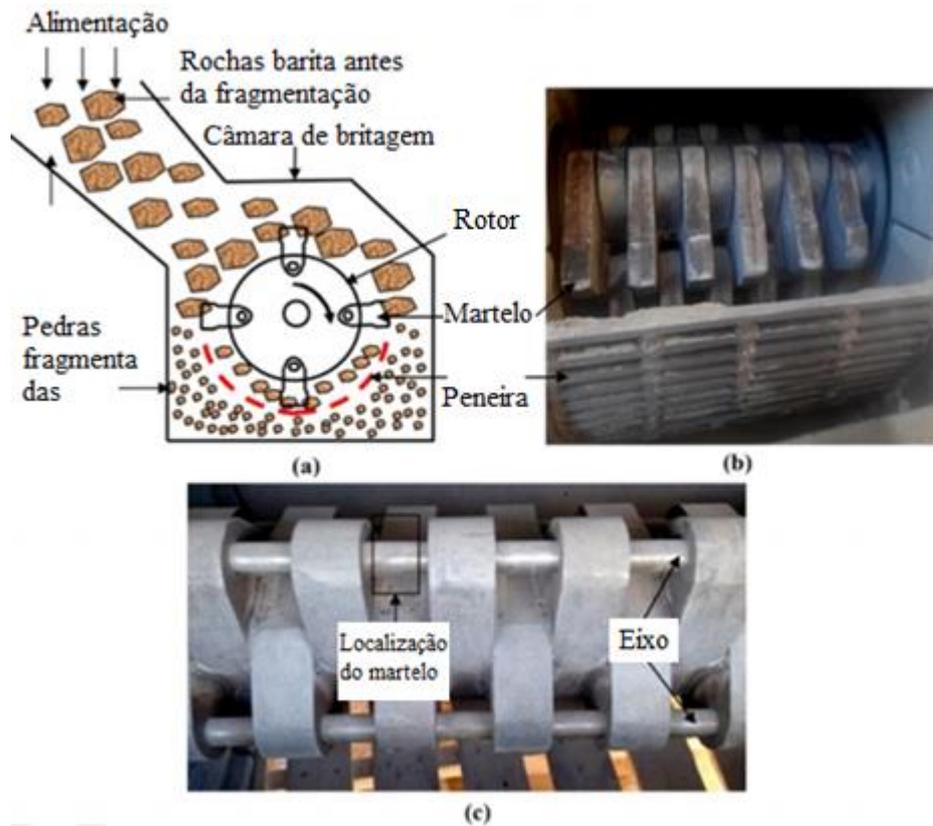


Figura 23. Martelo industrial triturador: (a) Representação esquemática de esmagamento operacional (b) vista real do triturador de martelo e (c) vista de rotor. (KALLEL, ZOUC, ANTAR, BAHRI, ELLEUCH, 2017).

Após o primeiro trituração, grande parte da rocha barita se transforma em pó e a outra parte ainda não se transformou em pó, mas já são partículas com tamanhos menores que o inicial, como mostrado na Figura 24.

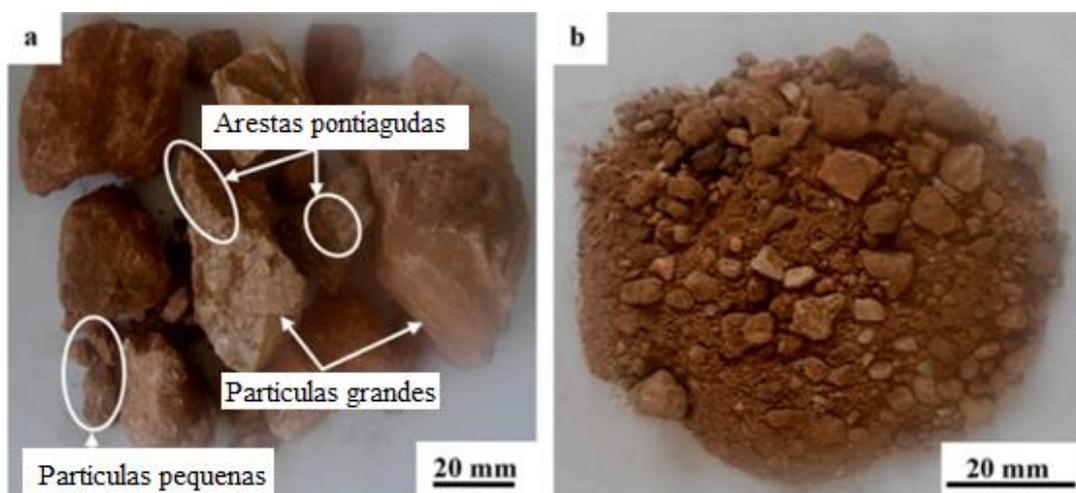


Figura 24. (a) Rochas barita antes do esmagamento com partículas de tamanho de 0-100 mm e (b) Rochas barita com tamanho de partícula de 0-5 mm. (KALLEL, ZOUC, ANTAR, BAHRI, ELLEUCH, 2017).

Existem dois mecanismos predominantes de falha prematura do martelo, segundo Kallel, Zouch, Antar, Bahri e Elleuch. Falha por choques mecânicos entre a rocha e o martelo e falha por cisalhamento entre o pó da rocha que desliza sobre a superfície do martelo.

O mecanismo de falha por choques mecânicos ocorre devido à impactos em regiões duras da liga do martelo, regiões muito duras são frágeis e não suportam choques mecânicos, mas são muito resistentes à compressão.

O mecanismo de falha por cisalhamento depende da abrasividade da rocha, quanto mais abrasivo for, maior será o desgaste por abrasão.

A Figura 25 mostra o martelo desgastado pelos dois modos de falha.

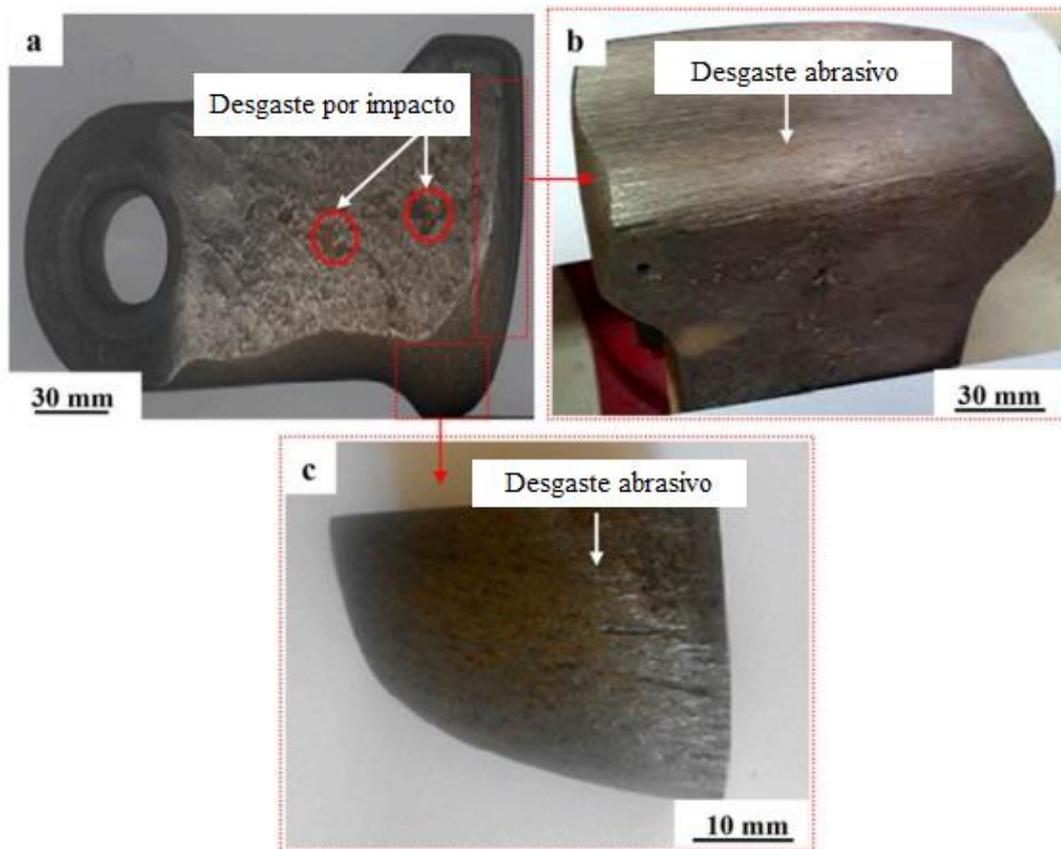


Figura 25. Martelo vista superfície danificada: (a) superfície lateral, (b) superfície superior e (c) a superfície de canto. (KALLEL, ZOUCHE, ANTAR, BAHRI, ELLEUCH, 2017).

O desgaste prematuro desse material gera um alto custo de manutenção devido à mão de obra qualificada para realizar a troca, ao custo do martelo e à estagnação da mineradora para efetuar a manutenção.

Realizar tratamentos térmicos a fim de eliminar regiões duras na liga do martelo é uma solução para o desgaste prematuro. Outra solução é aumentar a distância entre o martelo e as

rochas na parte inferior da máquina a fim de que o martelo tenha menos contato com a rocha em pó, minimizando, assim, o desgaste abrasivo.

A Figura 26 ilustra uma comparação das dimensões e massas entre um martelo novo e um martelo usado, durante uma semana de operação.

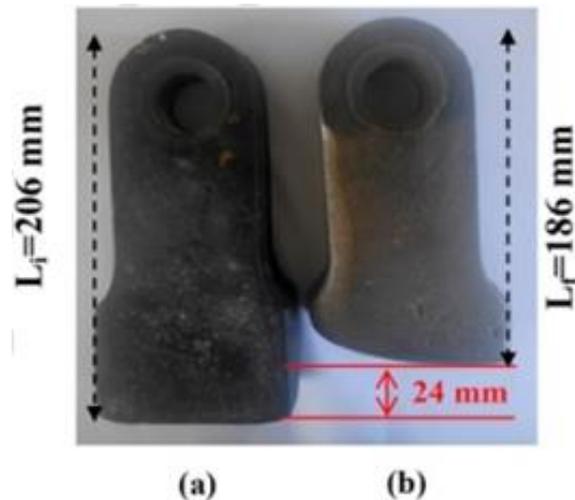


Figura 26. Vista geral de (a) martelo não usado, (b) martelo desgastado (KALLEL, ZOUCHE, ANTAR, BAHRI, ELLEUCH, 2017).

Tabela 4. Comparação de dimensões e massa entre o martelo não usado e desgastado (KALLEL, ZOUCHE, ANTAR, BAHRI, ELLEUCH, 2017).

Dimensões e massa do martelo não usado e do desgastado		
	Martelo sem uso	Martelo desgastado
Comprimento (mm)	206	186
Espessura (mm)	45	40
Massa (kg)	5,375	4,24

O mecanismo de trituração de rochas baritas é o mesmo para trituração de rochas calcárias, o que muda são as propriedades mecânicas e físicas das rochas. No caso da trituração de rochas calcárias, o mecanismo predominante de falha é a falha por abrasão entre a rocha e o martelo. A rocha calcária é muito frágil e quebra com facilidade, então não provocará falha no martelo por choques mecânicos, mas, em contrapartida, causará falha no martelo por cisalhamento, devido à alta abrasividade, de acordo com a Figura 27.

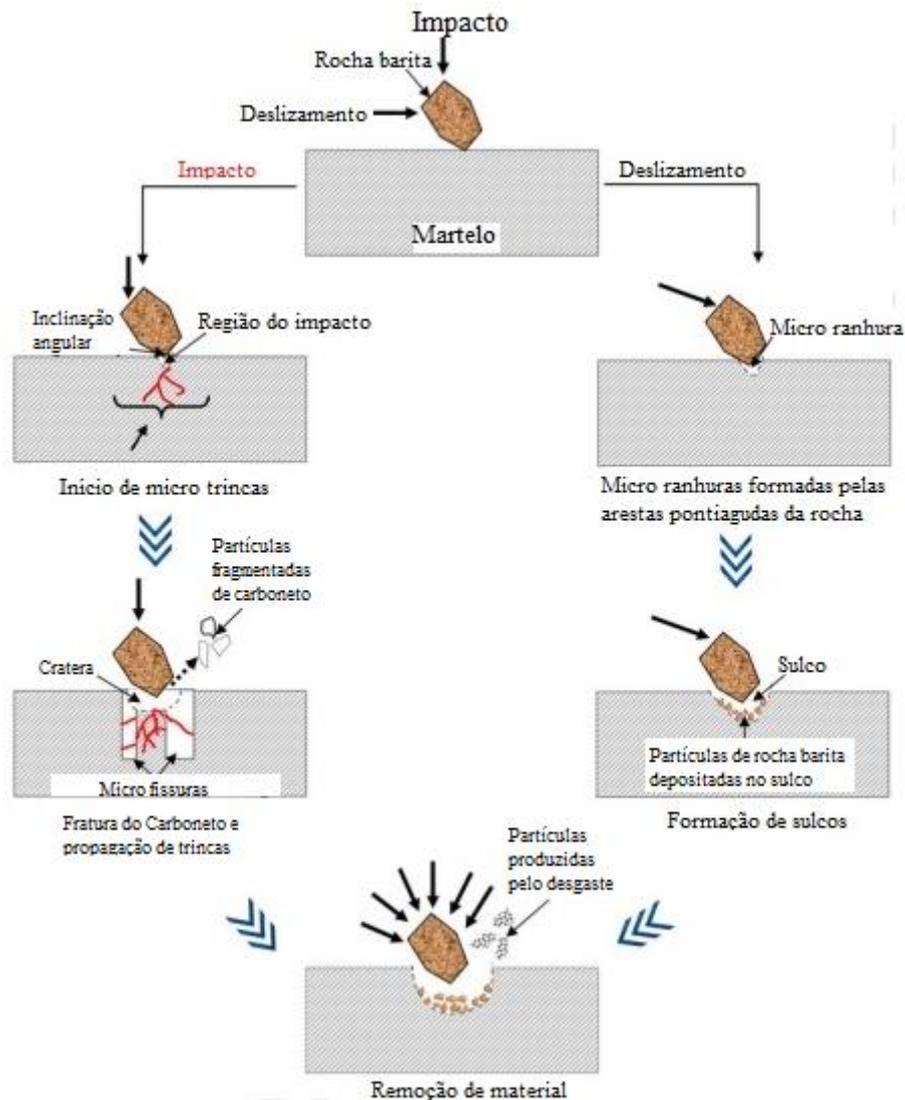


Figura 27. Ilustração esquemática de carbonetos de desprendimento da matriz. (KALLEL, ZOUCHE, ANTAR, BAHRI, ELLEUCH, 2017).

### 3.2 RECOMENDAÇÕES DE UTILIZAÇÃO DOS BRITADORES

De acordo com Santana e Charbel, (2009), o tipo de britador desejado é escolhido em função da rocha em que se deseja reduzir a granulometria e os estágios de britagem estão relacionados com o tamanho das partículas do produto final, quanto maior for a redução granulométrica desejada, mais estágios de britagem serão necessários. As reduções granulométricas primárias são da ordem de metros enquanto que as secundárias, terciárias e quaternárias são da ordem de centímetros à micrometros. As recomendações do tipo de britador em função de sua utilização estão listadas na Tabela 5.

Tabela 5. Aplicação operacional de cada britador. (SANTANA e CHARBEL, 2009).

Tipo de Britador	Aplicação Operacional	
	Etapa de Britagem	Utilização
Mandíbulas	Primária Secundária	<ul style="list-style-type: none"> <li>➤ Os britadores de mandíbulas aplicam-se para rochas de qualquer dureza, porém, que apresentem baixo teor de umidade e argila.</li> <li>➤ É um britador de uso muito comum em unidades de britagem.</li> </ul>
Giratório	Primária Secundária	<ul style="list-style-type: none"> <li>➤ Os britadores giratórios aplicam-se para rochas de qualquer dureza, porém, que apresentem baixo teor de umidade e argila, sendo que o britador giratório apresenta maior produtividade do que o britador de mandíbulas.</li> </ul>
Rolo Dentado	Primária	<ul style="list-style-type: none"> <li>➤ O britador de rolo dentado aplica-se para rochas brandas como carvão, ou rochas com alta umidade e argila.</li> </ul>
Cônico	Secundária Terciária Quaternária	<ul style="list-style-type: none"> <li>➤ Os britadores cônicos aplicam-se para rochas de qualquer dureza, porém que apresentem baixo teor de umidade e argila.</li> <li>➤ Muito utilizado em usinas de britagem de pedreiras para dar um formato mais cúbico às britas.</li> <li>➤ É o equipamento mais empregado nesta etapa. Em muitas usinas estes equipamentos preparam o material para alimentar um moinho, portanto, constituindo o último estágio de britagem.</li> </ul>
Rolos	Primária Secundária Terciária	<ul style="list-style-type: none"> <li>➤ Caracteriza-se por gerar pouco fino, porém pode promover fraturas internas nos fragmentos britados, condição esta a qual não pode ser detectada por análise granulométrica, e que pode constituir-se em aspecto positivo (se mesmo anteceder uma operação de moagem), ou em aspecto negativo (se o produto britado é para gerar agregado graúdo ou miúdo).</li> <li>➤ Industrialmente pouco aplicado devido ao desgaste diferenciado que ocorre nos rolos, resultado da alimentação não distribuir ao longo do comprimento dos rolos e sim concentrar mais na parte central. Apresenta bom desempenho com materiais argilosos.</li> </ul>

### **3.3 PROBLEMAS COMUNS NOS BRITADORES, CAUSAS E SOLUÇÕES COMUMENTE ADOTADAS**

A Tabela 6, de Santana e Charbel, (2009), relaciona os problemas dos britadores com suas respectivas causas e soluções comumente adotadas.

A Tabela 6. Problemas – causas e soluções. (SANTANA e CHARBEL, 2009).

Problemas	Descrição	Causa	Solução
Empastalamento	Materiais aderem aos revestimentos e não escoam.	Alimentação com grande quantidade de materiais argilosos, finos e úmida.	<ul style="list-style-type: none"> <li>Realizar o escalpe de finos.</li> </ul>
Entupimento (“blocking”)	Alimentação do com blocos ou fragmentos maiores do que a abertura de entrada do britador.	Deve-se ao desmonte de rochas, o qual pode estar gerando blocos com tamanhos inadequados à alimentação do britador primário.	<ul style="list-style-type: none"> <li>Disponibilizar um rompedor hidráulico na frente de lavra ou uso alternativo de um “drop ball”;</li> <li>Realizar um escalpe de grossos na alimentação do britador.</li> <li>Utilizar uma pinça hidráulica para retirar os matacões.</li> </ul>
Atolamento (“bridging”)	As partículas dentro da câmara de britagem de formam um arco que sustenta as partículas acima delas e impedem a passagem das mesmas, cessando o escoamento.	Pode ser a forma de alimentação do britador.	<ul style="list-style-type: none"> <li>Otimizar a alimentação do britador.</li> <li>Colocação de um calço (fragmentos de rochas em geral);</li> </ul>
Afogamento (“chocking”)	Condição operacional quando a alimentação transborda da abertura de entrada do britador.	<p>A medida que a rocha desce na câmara de britagem coexistem as seguintes situações:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>O fenômeno de empolamento da rocha britada;</li> <li>Estreitamento do perfil da câmara de britagem</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Regular a vazão de alimentação do britador.</li> </ul> <p>Obs. É condição operacional comum britadores trabalharem com a condição de câmara afogada, assim, a vazão de alimentação é igual à vazão de descarga.</p>

Nos britadores de impacto de eixo horizontal, utilizados para reduções granulométricas primária do calcário, não há o problema de empastalamento, uma vez que a rocha calcária não possui argila em sua estrutura, ou existe em quantidades mínimas, como pode ser observado na

análise feita por Freitas, (2008), em uma amostra de calcário retirada da mineradora MOCAL, localizada em Monte Cristo, ES, disponível na Tabela 7.

Tabela 7. Composição de uma amostra de rocha calcária, retirada da MOCAL, ES. (FREITAS, 2008)

Mineral	Wt %
Calcita	95
Dolomita	3
Quartzo	0,6

O problema de entupimento ocorre por haver uma interrupção (matação), causado por fragmentos maiores que a boca de alimentação do britador, esse problema deve ser resolvido retirando as rochas da natureza com diâmetros médios menores. Neste caso os processos de retirada da rocha devem ser revisados e redefinidos para garantir que as rochas cheguem ao britador com os diâmetros médios menores que a entrada de alimentação do britador. Geralmente se tem um sistema de pinça hidráulica do lado de fora do britador para retirar as rochas que entopem a passagem contínua das rochas.

O problema de atolamento ocorre devido a uma configuração geométrica específica das rochas na entrada, que formam um arco de sustentação que impede as rochas de entrar no britador, nesse caso, o britador continua girando mas o processo de britagem é cessado. Esse problema é muito difícil de ser resolvido, uma vez que diferentes organizações geométricas vão criar diferentes arcos de sustentação, então, a solução mais utilizada é o mesmo sistema de pinça hidráulica para remoção das rochas que entopem o britador.

O problema de afogamento consiste em uma alimentação excessiva onde, eventualmente, há uma alimentação maior que a capacidade de britagem do britador, isso sobrecarrega o britador, força o sistema de acionamento e favorece o travamento do rotor. Esse problema é crítico, uma vez que cessa o processo de britagem, então o britador deve ser aberto para remoção, com a pinça hidráulica, de rochas não britáveis.

Essa configuração de superalimentação do britador, aliado com pedaços de rochas não britáveis, geram o travamento do rotor, com o britador ligado, as correias começam a deslizar até falharem ou saírem das polias, o motor é sobrecarregado e o sistema todo de britagem é cessado, então, um técnico deve ser acionado para arrumar o britador, eventualmente trocar componentes, fazer ajustes, para, assim, voltar a operar em condições nominais. Isso tem um custo muito alto, valores que não são divulgados pelas mineradoras, por dois motivos principais, o cessamento da produção por um determinado tempo e as eventuais trocas de componentes.

### 3.4 MATRIZ DE DECISÃO

Na Tabela 8 é apresentada uma matriz de decisão, na qual são atribuídos pesos de 0 a 10 para cada problema, levando em conta o grau de relevância desses para bom funcionamento e baixo custo de manutenção de cada tipo de britador.

Tabela 8. Matriz de decisão para os problemas apresentados pelos tipos de britadores.

Matriz de decisão			
Tipo de Britador	Problemas	Peso	Total
Mandíbulas	Atolamento ("bridging")	6	21
	Capacidade limitada devido a devido a largura pequena na saída de material	7	
	Necessidade de substituição das mandíbulas com o tempo	8	
Impacto de eixo horizontal	Não pode ser aplicado para rochas abrasivas	9	31
	Elevado custo de manutenção	8	
	Desgaste em curto prazo dos martelos	8	
	Empastalamento	6	
Impacto de eixo vertical	Empastalamento	6	12
	Atolamento ("bridging")	6	
Martelos	Entupimento ("blocking")	7	15
	Corrosão dos componentes de britagem	8	
Rolo Dentado	Entupimento ("blocking")	7	15
	Desgaste dos componentes por abrasão	8	
Bolas	Entupimento ("blocking")	7	14
	Empastalamento	7	

De acordo com os totais mostrados na Tabela 8, foi escolhido abordar o britador de impacto de eixo horizontal, visando resolver uma boa parte dos problemas apresentados ao longo de seu funcionamento. Tais soluções serão apresentadas propondo um sistema de aperfeiçoamento da máquina, com o intuito de evitar danos aos componentes mecânicos do britador.

### 3.5 ANÁLISE ENERGÉTICA

O carbonato de cálcio possui densidade maior do que a maioria das rochas, fato que exige grande resistência as peças da máquina. O valor da sua taxa de ruptura a compressão o classifica como uma rocha R5, ou seja, taxa de ruptura muito elevada proporcionando grande resistência em relação a outros minérios. A sua abrasividade é identificada conforme a dureza, que por ser inferior a 5,5 Mohs, o classifica como um material de dureza inferior, sendo menor que alguns minerais (dureza > 7 Mohs) mas possuindo dureza dentro da faixa de uma grande quantidade de rochas. Possui grãos abrasivos aglomerados em discos, blocos e formas especiais, tendo algumas aplicações como abrasivo, especialmente no polimento de latão, cobre, bronze, aço, pérolas, celuloide e materiais similares.

Na Tabela 9 são apresentadas as propriedades do carbonato de cálcio.

Tabela 9. Propriedades físicas e mecânicas do carbonato de cálcio.

Propriedades do Carbonato de Cálcio (CaCO <sub>3</sub> )	
Massa específica	2800 kg/m <sup>3</sup>
Tensão de ruptura sob compressão	160 MPa
Tensão de ruptura sob tração	20 MPa
Tensão de ruptura sob flexão	8 MPa
Módulo de elasticidade	74 GPa
Coefficiente de Poisson	0,23
Dureza	5,3 Mohs
Abrasividade	32,57 g/m <sup>2</sup>

O índice de trabalho ( $W_i$ ) corresponde, numericamente, à energia total, expressa em kWh por tonelada curta (*short tonne* = 907 kg), necessária para reduzir a granulometria do minério, desde um tamanho teoricamente infinito até 80% passante em 100  $\mu\text{m}$  (Figueira, 2004). O  $W_i$  corresponde à resistência do minério à moagem e, com esse parâmetro, torna-se possível calcular a energia (kWh/st) necessária para moer o minério a uma determinada granulometria.

Existem duas classificações para reduções granulométricas: Britagem ou moagem. Britagem se o tamanho das partículas for maior que  $10^4 \mu\text{m}$  e moagem se o tamanho das partículas for menor que  $10^4 \mu\text{m}$  até virar pó.

Usar a teoria de Rittinger, de Bond ou de Kick depende do tamanho que se deseja reduzir a granulometria de uma partícula, a partir de um certo valor a teoria começa a divergir dos valores reais, na forma que está descrito na Figura 28. Cada redução granulométrica está associada a um consumo de energia dependendo do tamanho final da partícula que se deseja, de acordo com a Figura 28.

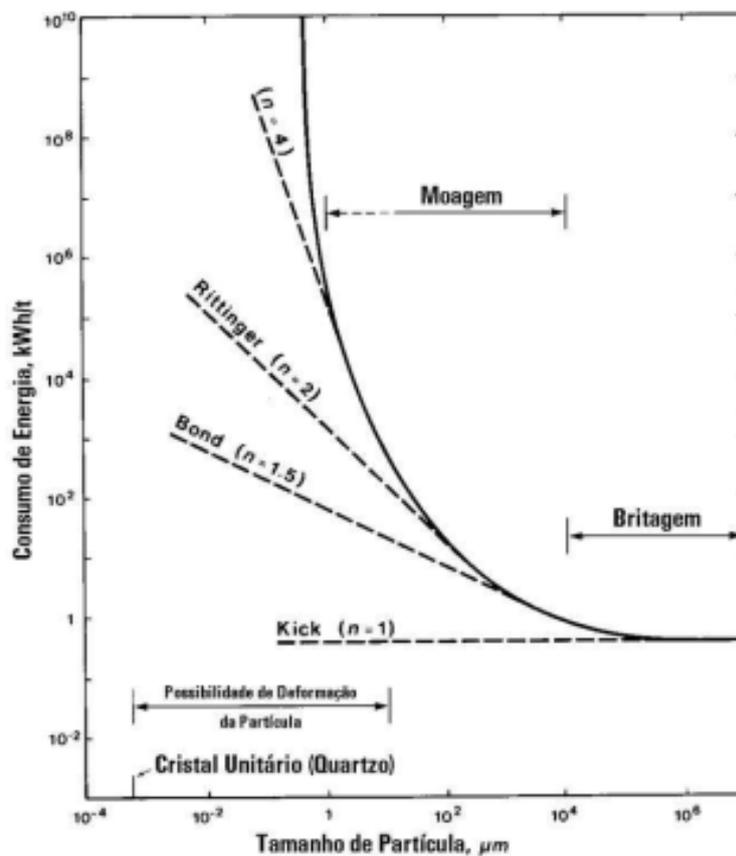


Figura 28. Variação do consumo de energia em função do tamanho da partícula (GALERY, 2011).

Bond convencionou um experimento padrão com malhas quadradas que deixam passar 80% da alimentação e do produto final. Propôs que o coeficiente de proporcionalidade ou trabalho  $E_0$  fosse chamado de  $W_i$  (*work index*), definindo-o como a energia necessária (kWh) para reduzir a unidade de peso (st) do material considerado desde um tamanho inicial infinito até 80% passante em uma peneira de 100  $\mu\text{m}$  (GALLERY, 2011). Através dessas definições, o trabalho de Bond está descrito na Eq.1.

A energia, em kWh, necessária para reduzir uma partícula de tamanho  $D_{f80}$  para um tamanho de  $D_{p80}$  é determinada por:

$$E = 10W_i \left( \frac{1}{\sqrt{D_{p80}}} - \frac{1}{\sqrt{D_{f80}}} \right) \quad (1)$$

Onde:

- E - Energia, em kWh/st, para moer uma tonelada curta (st) do minério;
- $W_i$  - Índice de trabalho (*work index*), em kWh/st (quilowatts hora por tonelada curta);
- $D_{p80}$  - Abertura da peneira, em micrômetros ( $\mu\text{m}$ ), através da qual passam 80% da massa do produto;
- $D_{f80}$  - Abertura da peneira, em micrômetros ( $\mu\text{m}$ ), através da qual passam 80% da massa da alimentação.

A

Tabela 10 apresenta valores médios do índice de trabalho e pesos específicos para minérios comumente utilizados em processos de mineração. Com o valor do índice de trabalho é possível calcular, através da Eq. 1, a energia necessária para reduzir a granulometria de uma tonelada curta (907 kg) de minério com tamanho inicial  $D_{f80}$  para um tamanho final de  $D_{p80}$ .

Tabela 10. Índice de trabalho (Wi) e peso específico médio de alguns minerais. (Galery, 2011).

Material	Massa Específica (g/cm <sup>3</sup> )	Índice Wi (kWh/st)
Barita	4,50	4,73
Gipsita	2,69	6,73
Fluorita	3,01	8,91
Minério Piritoso	4,06	8,93
Quartzito	2,68	9,58
Magnetita	3,88	9,97
Minério Pb-Zn	3,54	10,57
Feldspato	2,59	10,80
Dolomita	2,74	11,27
Calcário	2,65	12,54
Minério de Cobre	3,20	12,73
Minério Hematítico	3,56	12,93
Quartzo	2,65	13,57
Minério de Ouro	2,81	14,93
Granito	2,66	15,05
Grafita	1,75	43,56

Selecionando, do catálogo da Metso, o britador de impacto NP1007, que possui abertura de alimentação de 750 mm x 800 mm, com tamanho máximo de alimentação de 500 mm. Considerando que uma rocha de calcário possua um formato esférico, com 500 mm de diâmetro, e se queira fazer uma redução até 10 mm, ou seja, entra no britador com 500 mm de diâmetro e sai com 10 mm de diâmetro. Dessa forma, pode-se calcular a quantidade de energia necessária para fazer essa redução em uma tonelada curta (907 kg) dessa rocha:

$$E = 10.12,54 \left( \frac{1}{\sqrt{10000}} - \frac{1}{\sqrt{500000}} \right) \quad (2)$$

$$E = 1,07666 \text{ kWh/st} \quad (3)$$

(4)

$$E = 3,876 \text{ MJ/st}$$

Como  $1\text{J} = \text{kg} \cdot \text{m}^2/\text{s}^2$  e  $1\text{N} = \text{kg} \cdot \text{m}/\text{s}^2$ , pode-se comparar as unidades e concluir que  $1\text{J} = 1\text{N} \cdot \text{m}$ , isso significa que a energia necessária para cominuir uma tonelada curta de rochas esféricas de 500 mm de diâmetro em outras de 10 mm, é equivalente a um torque de  $3,876 \cdot 10^6$  N.m. Assim, a energia necessária para realizar essa redução em uma tonelada curta de rochas esféricas, é  $3,876 \cdot 10^6$  J, como ilustrado na Figura 29.

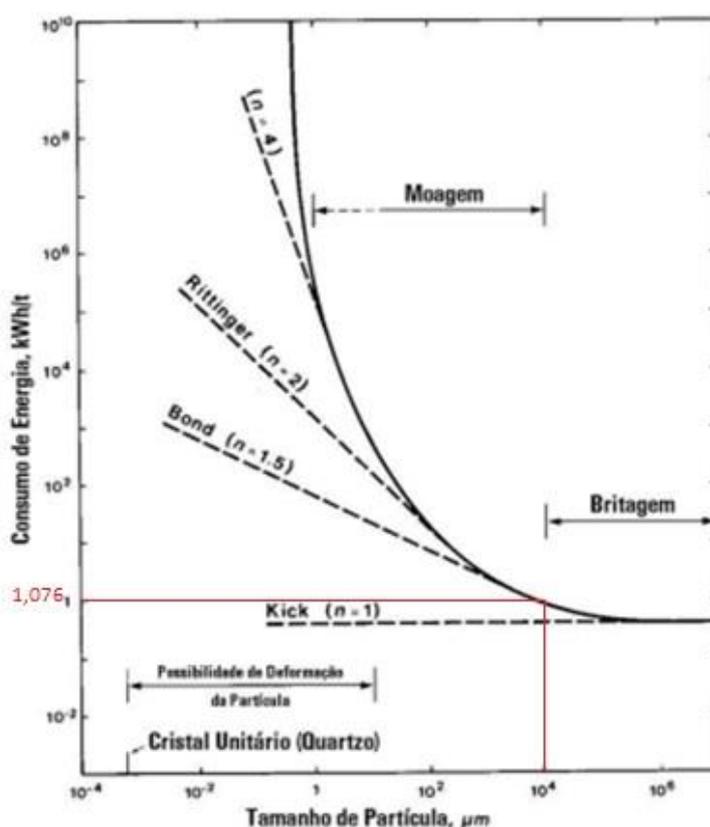


Figura 29. Energia para redução de 500 mm até 10 mm.

Uma esfera de 500 mm de diâmetro possui volume de  $65.450 \text{ cm}^3$ , como o peso específico do calcário é  $2,65 \text{ g/cm}^3$ , então esse volume possui massa de aproximadamente 173 kg, dessa forma, uma tonelada curta de calcário seriam, aproximadamente, 5,25 rochas esféricas de diâmetro 500 mm.

### 3.6 ANÁLISE DE FORÇAS

Definindo um britador com rotor de diâmetro 1500 mm, e considerando o ponto de aplicação da carga a 1m do centro do eixo.

A energia necessária para reduzir uma tonelada curta de rocha calcária, no formato esférico, com diâmetro inicial de 500 mm até 10 mm é de 3,876 MJ, como 1 Joule é equivalente a um torque de 1 N.m, então 3,876 MJ é equivalente a um torque de 3,876 MN.m, ou seja, se o ponto de aplicação da carga está a 1m, significa que o somatório de forças em todas as direções para produzir um torque de 3,876 MN.m a uma distância de 1m é 3.876 KN. Essa força é o somatório de todas as forças envolvidas, em todos os choques mecânicos entre as rochas e o martelo, entre as rochas e as outras rochas e entre as rochas e a carcaça do britador para fazer essa redução em uma tonelada curta de rocha calcária para rochas esféricas menores com diâmetro médio de 10 mm.

Como uma tonelada curta dessa rocha calcária possui aproximadamente, 5,25 rochas de diâmetro inicial de 500 mm, então esse somatório de todas as forças para cominuir uma tonelada curta dessa rocha, pode ser dividido entre essas 5,25 esferas, logo, seriam necessários um somatório de forças igual a 738 KN por esfera.

Essa força resultante  $F = 738 \text{ KN}$ , portanto, é o somatório de todas as forças, ou seja,  $F_1 + F_2 + F_3 + F_5 + F_6 + F_7 + F_8 + \dots + F_n$ , como ilustrado na Figura 30, existentes entre as rochas e o martelo, entre as rochas e as outras rochas e entre as rochas e a carcaça do britador, para fazer a redução até 10 mm em uma das 5,25 rochas que uma tonelada curta possui.

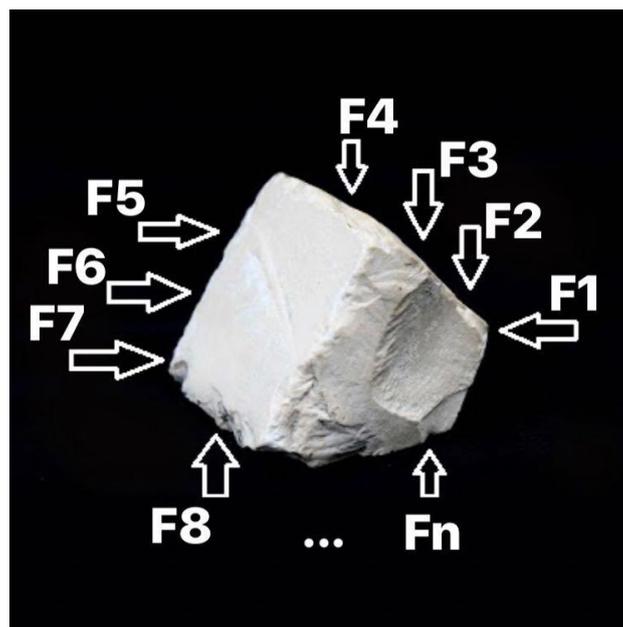


Figura 30. Forças atuantes na cominuição do calcário.

### 3.7 PROTEÇÃO CONTRA IMPACTO (ANTEPARO/BIGORNA)

Bigornas ou pratos são as estruturas que ajudam na britagem. As pedras são lançadas pelo martelo contra as bigornas, reduzindo a sua granulometria. Estas estruturas podem ser feitas de chapas grossas, geralmente reguláveis e com uma mola para redução de choques rígidos, minimizando falhas por impacto, podendo alterar a orientação para maior ou menor ângulo de contato, bem como a distância entre o rotor e a bigorna. Esse mecanismo regulável também ajuda na mudança do ângulo em que o material incide sobre a bigorna de modo a obter o tamanho desejado e a forma das partículas fragmentadas. Um número, geralmente 3, de bigornas são usadas para obter a fragmentação em diferentes níveis e ângulos, como mostrado na Figura 31.



Figura 31. Vista lateral de bigornas fixas montadas em um mostruário (KALLEL, ZOUCHE, ANTAR, BAHRI, ELLEUCH, 2017)

A bigorna pode ser considerada uma viga retangular regulada a um ângulo  $\theta$  com o eixo vertical. A situação mais crítica é quando  $\theta = 0$ , ou seja, a rocha é lançada em uma trajetória ortogonal à bigorna.

### 3.8 PROPOSIÇÃO DE CONCEITO

A Figura 37 mostra a solução projetada. Esse britador é composto por um eixo central que possui uma polia movida em sua extremidade direita, dois rolamentos de apoio, um rotor central constituído por 4 partes idênticas, unidas por 56 parafusos de fixação. Esse britador também possui quatro martelos que impulsionam as rochas até os 3 anteparos para a realização das reduções granulométricas. A carcaça do britador é composta por duas partes, uma fixa e outra removível para manutenção da máquina.

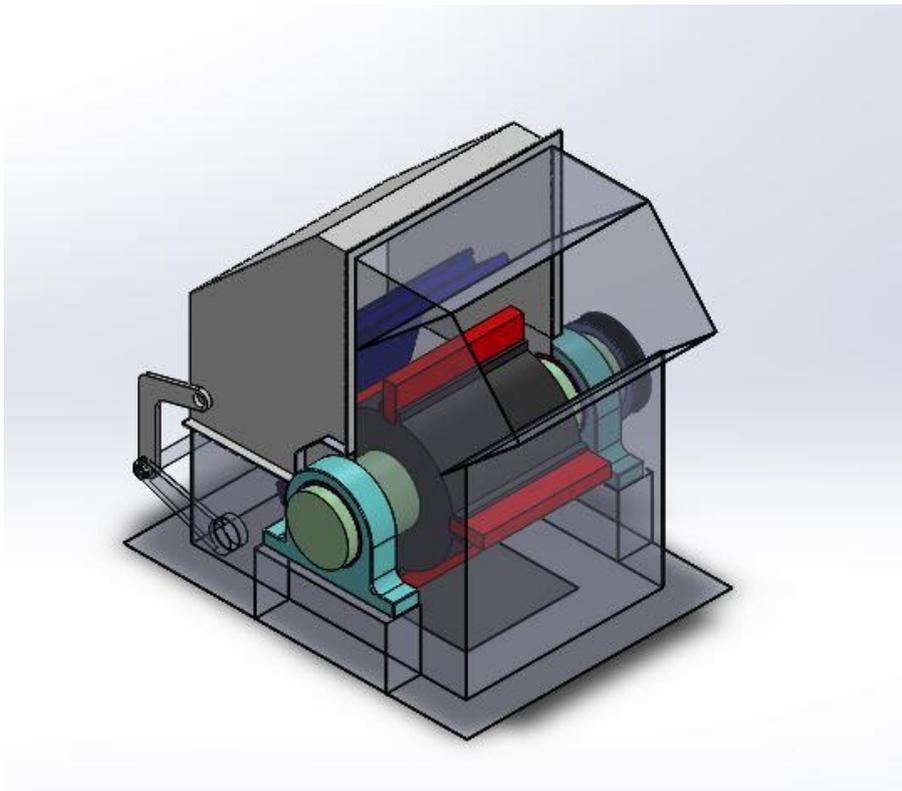


Figura 32. Vista isométrica do britador.

A Figura 36 mostra a parte central do britador, que é composta pelo eixo, as 4 partes do rotor e os martelos. A Figura 37 mostra a visão explodida dessa parte central.

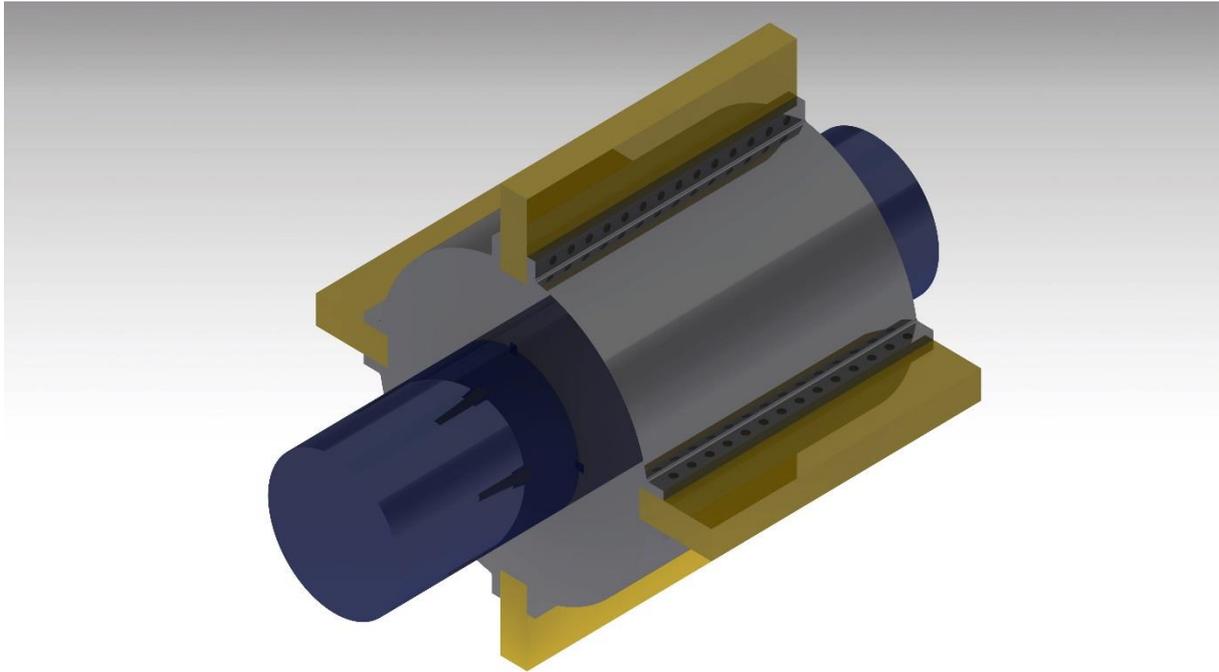


Figura 33. Vista isométrica do centro do britador montado.

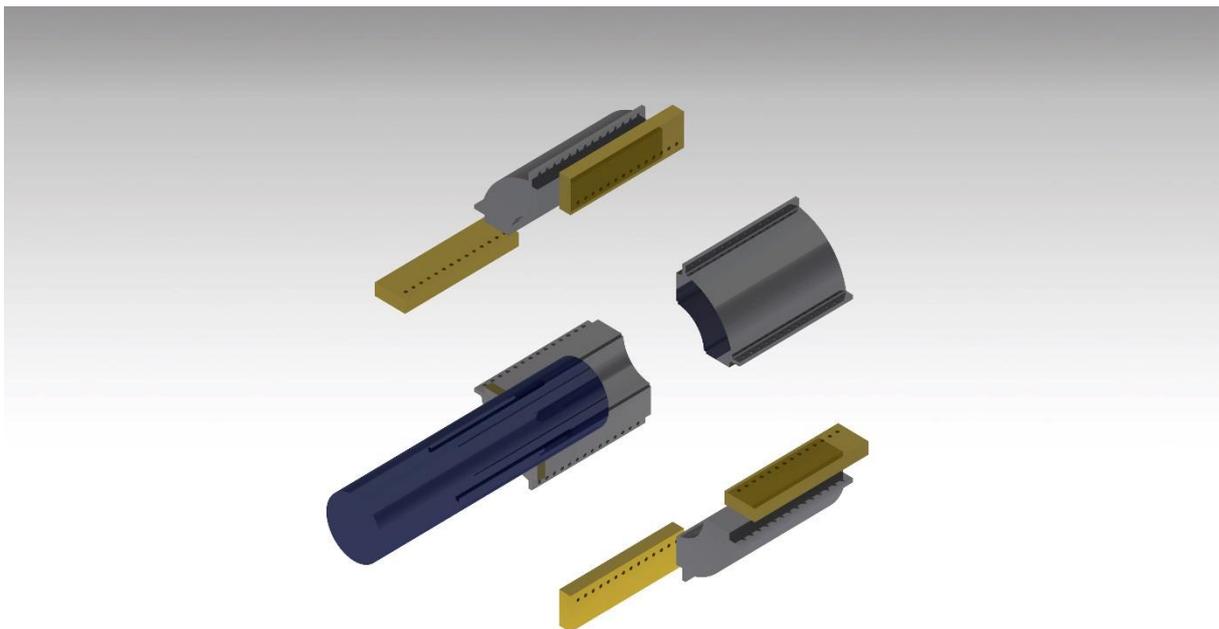


Figura 34. Vista explodida do centro do britador.

Com a força  $F = 738 \text{ kN}$ , que é o somatório de forças necessário para reduzir a granulometria de uma rocha esférica de 500 mm até 10 mm de diâmetro, é possível dimensionar todos os outros elementos da máquina, começando pelo martelo, depois bigorna, eixo de sustentação do rotor, o rotor, rolamentos, sistema de acionamento e outros elementos da máquina.

## 4 DIMENSIONAMENTO

*Neste capítulo serão dimensionados o martelo, o anteparo, o eixo. Martelos e anteparos serão simulados por elementos finitos para verificar se são seguros.*

### 4.1 PROJETO DO MARTELO

Os martelos serão dimensionados contra flexão, com carregamento de 738 kN aplicado nas fibras superiores para obtenção do maior momento fletor para ser comparado com o momento admissível. Os martelos estão sujeitos à forças de cisalhamento no ponto de engaste, força centrífugas devido à rotação e forças de flexão do martelo devido ao impacto da rocha calcária com o martelo na entrada do britador, que nesse projeto vai possuir porta de alimentação de 1000 mm por 700 mm para permitir a entrada de rochas com diâmetro de 500 mm.

Os martelos podem ser feitos usando barras com seções diferentes, as seções I e T são mais usuais. Os martelos são montados no rotor do britador que, por sua vez, é montado em um eixo apoiado por dois rolamentos que transferem a carga para a carcaça do britador.

Tabela 11. Propriedades mecânicas do martelo feito de ferro fundido branco de alto-cromo (KALLEL, ZOUCH, ANTAR, BAHRI, ELLEUCH, 2017).

Módulo de elasticidade	$E$	172 GPa
Limite de ruptura	$\sigma_r$	2.460 MPa
Limite de escoamento	$\sigma_y$	2.051 MPa
Taxa de encruamento	$e_r$	8%

Na Tabela 12 são apresentadas as propriedades físicas e geométricas do martelo feito de aço ao cromo apresentado no estudo de Kallel, Zouch, Antar, Bahri, Elleuch, 2017.

Tabela 12. Propriedades físicas e geométricas do martelo feito de ferro fundido branco de alto-cromo (KALLEL, ZOUC, ANTA, BAHRI, ELLEUCH, 2017)

Comprimento de barra	l	1500 mm
Largura da barra	b	400 mm
Espessura da barra	d	150 mm
Densidade	$\rho$	7,5 g/cm <sup>3</sup>
Massa da barra	m	450 Kg

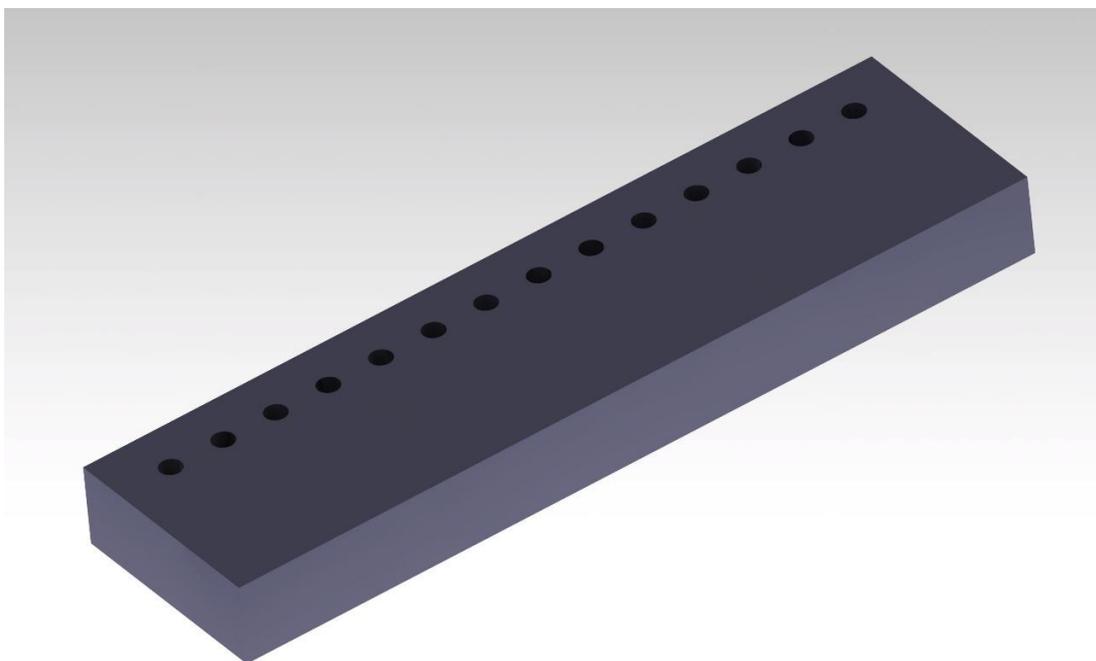


Figura 35. Desenho do martelo utilizando o software CATIA V5. A figura está em escala 15:1.

$$\text{Módulo de elasticidade (E)} = 172 \text{ GPa} = 172 \cdot 10^3 \text{ N} / \text{mm}^2;$$

$$\text{Tensão de escoamento } (\sigma_y) = 2051 \text{ MPa} = 2051 \text{ N} / \text{mm}^2;$$

1/3 da largura do martelo estará fixada dentro do rotor, ou seja, 2/3 de sua área entrará em contato com a rocha. Assim, 67% da área do martelo será utilizada para efetivamente triturar o calcário.

De acordo com BUDYNAS e NISBETT (2010), a deflexão (y) de uma viga submetida ao esforço puro de flexão é dada por:

$$y = \frac{P \cdot l^3}{3 \cdot E \cdot I} \quad (5)$$

Sendo I dado por:

$$I = \frac{l \cdot d^3}{12} \quad (6)$$

Então y é:

$$y = \frac{P \cdot l^3}{3 \cdot E \cdot I} \quad (7)$$

$$\text{Sendo } I = \frac{l \cdot d^3}{12} = \frac{1500 \cdot 150^3}{12} = 421,88 \cdot 10^6 \text{ mm}^4 \quad (8)$$

$$E \cdot I = 7,26 \cdot 10^{13} \quad (9)$$

$$y = \frac{738 \cdot 10^3 \cdot 1500^3}{3 \cdot 7,26 \cdot 10^{13}} \quad (10)$$

$$y = 11,44 \text{ mm} \quad (11)$$

Onde:

- y é a deflexão máxima (mm);
- P é a carga estática (N);
- l é o comprimento da viga (mm);
- E é o módulo de elasticidade (N/mm<sup>2</sup>);
- I é o momento de inércia da viga.

A deflexão máxima ( $y$ ) em mm que a viga irá experimentar com uma carga de 738 KN localizada na ponta da viga (situação mais crítica). Essas condições são conservadoras, pois considera que a carga é aplicada na parte superior do martelo, considera também que a viga será reduzida de 500 mm para 10 mm em um choque apenas, mas isso nem sempre acontece, geralmente existem sucessivas etapas de britagem. Cada mineradora possui uma quantidade própria de etapas de britagem.

Ainda de acordo com BUDYNAS e NISBETT (2010), o momento admissível ( $M_{all}$ ) pode ser calculado por:

$$\sigma_{all} = \frac{M_{all} \cdot c}{I} \quad (12)$$

Resolvendo para  $M_{all}$ , temos:

$$M_{all} = \frac{\sigma_{all} \cdot I}{c} \quad (13)$$

$$M_{all} = \frac{2051.281,25 \cdot 10^6}{267} \quad (14)$$

$$M_{all} = 2,16 \text{ GN} \cdot \text{mm} \quad (15)$$

O momento máximo ( $M_{max}$ ) experimentado pela viga é  $M_{max}$ :

$$M_{max} = \frac{2 \cdot P \cdot b}{3} \quad (16)$$

$$M_{max} = \frac{2 \cdot 738 \cdot 10^3 \cdot 400}{3} \quad (17)$$

$$M_{m\acute{a}x} = 0,197 \text{ GN. mm} \quad (18)$$

Como  $M_{all} > M_{m\acute{a}x}$ , o martelo é seguro contra flexão. As dimensões pré-selecionadas para o martelo podem ser adotadas.

O martelo, mostrado na Figura 35, foi simulado no software Abaqus, versão 6.14-1, com o intuito de se obter os campos de tensões e deformações do martelo. A seguinte rotina foi realizada:

- ✓ Desenho do martelo;
- ✓ Escolha do material e inserção das propriedades mecânicas elásticas. As propriedades mecânicas plásticas não foram inseridas pois não se deseja que as tensões excedam o limite de escoamento no martelo;
- ✓ A partição das geometrias é o terceiro passo, se faz partições para que se possam ser aplicadas as condições de contorno e as forças que o rotor e o martelo estarão submetidos. O particionamento também é importante para a elaboração de uma malha estruturada.
- ✓ Logo após a partição foi realizado a criação de uma seção, essa seção serve para que se possam adicionar as propriedades do material à geometria.
- ✓ Criação do step: O step é como o software irá realizar o procedimento para a integração da malha, se será uma integração de Gauss completa (*on*) ou reduzida (*off*). Foi criado um step com integração reduzida, ou seja, sem considerar as não linearidades causadas por grandes deformações, uma vez que o martelo é projetado para operar em regime elástico.
- ✓ Logo em seguida, foi feita a montagem e aplicação da carga distribuída nas fibras mais externas do martelo (situação mais crítica) e aplicação das condições de contorno (engastar 1/3 do martelo), de acordo com a Figura 36.

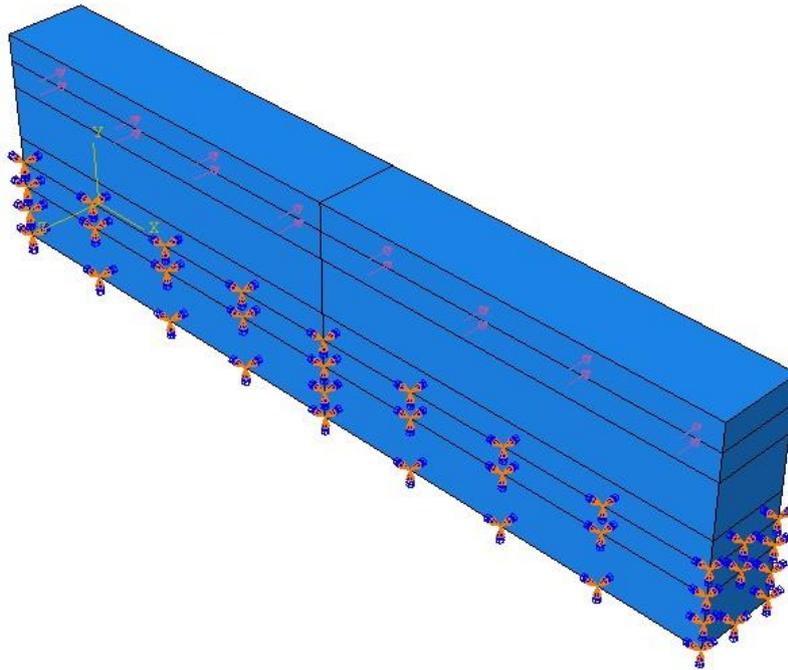


Figura 36. Aplicação da carga distribuída e condições de contorno no software ABAQUS versão 6.14-1. A figura está em escala de 15:1.

- ✓ Definição da malha: Um teste de convergência da malha foi realizado para garantir que as tensões máximas calculadas são realmente as tensões reais. Esse teste se faz, primeiramente, por meio da adoção de uma malha grosseira, largamente espaçada, logo em seguida ela é testada e os valores de tensões máximas são anotados, depois se faz uma malha menos grosseira, ou seja, com distâncias menores entre os nós, e o problema é simulado novamente e as tensões máximas são anotadas novamente. Esse processo de refinamento da malha ocorre até quando as tensões máximas começarem a convergir para um valor constante, assim se tem a certeza de que a simulação é válida. A malha de elementos hexaédricos tem tamanho global 30, com desvio 0,1.

A simulação foi realizada e a tensão máxima ocorreu sobre a linha onde se inicia a área contato da rocha com o martelo, como esperado. A tensão máxima equivalente de von Mises calculada pelo software foi de 81,98 MPa. Como o limite de escoamento do martelo é de 2.051 MPa, o coeficiente de segurança de projeto para esse martelo é de 25, que é um coeficiente de segurança absurdo, mas esse martelo tem um coeficiente de segurança tão alto pois os mecanismos de falha não são devido ao excesso de tensões no martelo e sim aos mecanismos de desgaste (abrasão) e impacto (choques). A Figura 37 representa o campo de tensões no martelo devido aos esforços.

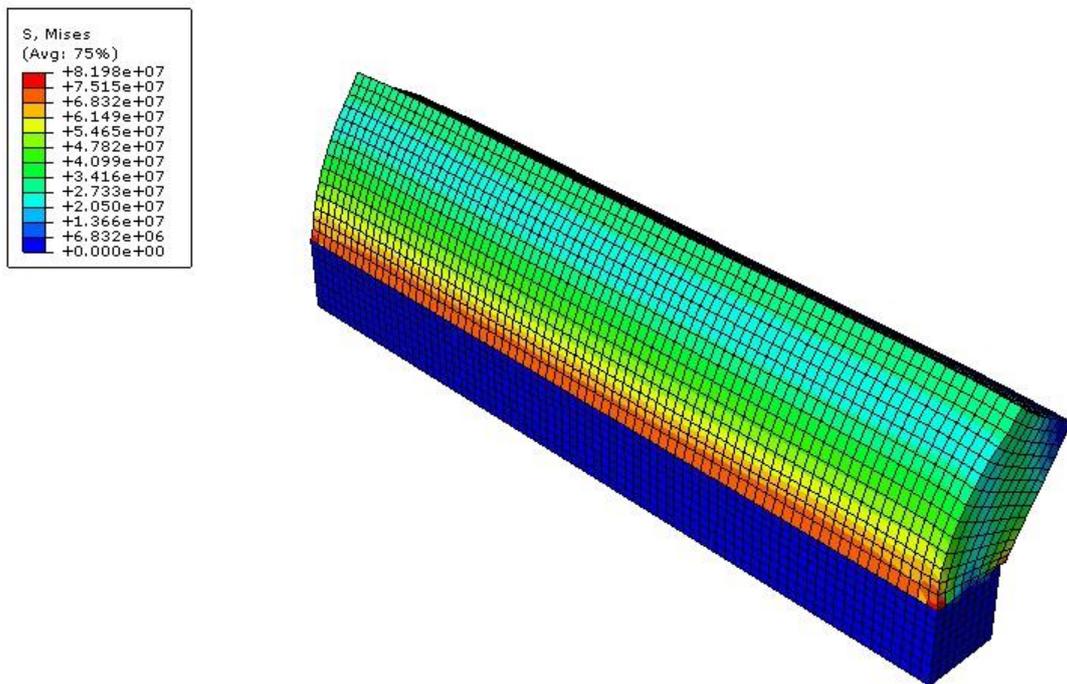


Figura 37. Campo de tensões obtido por simulação com elementos finitos no software ABAQUS versão 6.14-1. A figura está em escala de 15:1.

## 4.2 PROJETO DO ANTEPARO

Os anteparos serão dimensionados contra flexão, com carregamento de 738 kN aplicado nas fibras mais externas para obtenção do maior momento fletor para ser comparado com o momento admissível. Considerando que os anteparos sejam vigas retangulares alinhado a um ângulo  $\theta$  com o eixo horizontal. Força exercida pela partícula de entrada:

$$F = m \cdot r \cdot \omega^2 \quad (19)$$

Onde:

- $m$  = massa da partícula de entrada (massa específica de  $2,65\text{g/cm}^3$ ) = 173 kg;

- $r = \text{raio do rotor} = 1.500 \text{ milímetros} = 1,5 \text{ m};$
- $\text{Rotação } n = 480 \text{ rpm};$
- $\omega = \text{velocidade angular do rotor} = 2 \cdot \pi \cdot n / 60 = 16\pi \text{ rad/s}.$

Calculando o valor de F, obtemos:

$$F = 712,481 \text{ kN} \quad (20)$$

Essa força é muito próxima da força encontrada na análise energética  $F = 738 \text{ kN}$ . O valor da massa da partícula é obtido considerando uma esfera de 500 mm de raio.

Tabela 13. Propriedades físicas do anteparo feito de ferro fundido branco de alto-cromo.

Comprimento de barra	$l$	1500 mm
Largura da barra	$b$	1000 mm
Espessura da barra	$d$	100 mm
Densidade	$\rho$	7,5 g/cm <sup>3</sup>
Massa do anteparo	$m$	1.125 Kg

Assumindo que o anteparo seja feito de ferro fundido branco de alto-cromo, com  $\sigma_y = 2.051 \text{ MPa};$

Quando a carga é concentrada na ponta do anteparo, a carga incidente é  $P = 738 \text{ KN}$ . Essa condição é muito conservadora, pois considera que a rocha transfere toda a força que a impulsionou até o anteparo, integralmente, isso não é verdade, pois a rocha é fragmentada no primeiro impacto. Uma análise distribuindo a carga na área de contato do anteparo é mais fiel à realidade e será simulada por elementos finitos.

Podemos ver que o momento máximo ( $M_{\text{máx}}$ ) de flexão ocorre quando  $\theta = 0$  e é dado por:

$$M_{\text{máx}} = P \cdot l \cdot \cos\theta \quad (21)$$

Então:

$$M_{\text{máx}} = P.l = 1.107.000 \text{ kN.mm} \quad (22)$$

O momento máximo admissível à flexão:

$$M_{\text{all}} = \frac{\sigma_{\text{all}} \cdot I}{c} \quad (23)$$

Com I como representado abaixo e  $c=d$ :

$$I = \frac{l \cdot d^3}{12} = \frac{1500 \cdot 100^3}{12} = 125 \cdot 10^6 \text{ mm}^4 \quad (24)$$

$$M_{\text{all}} = \frac{2051 \cdot 125 \cdot 10^6}{100} \quad (25)$$

$$M_{\text{all}} = 2.563.750 \text{ KN.mm} \quad (26)$$

Como  $M_{\text{all}} > M_{\text{máx}}$ , as dimensões pré-determinadas para o anteparo são seguras contra flexão.

A mesma análise de elementos finitos foi realizada no anteparo para obtenção do campo de tensões, Figura 39. A maior tensão equivalente de Von Mises, foi de 49 MPa, mas o limite de escoamento do material é 2.051 MPa, portanto, o coeficiente de segurança para o anteparo é de 42. A maior tensão ocorre na mudança de seção da base de fixação com o anteparo, justificado pela presença de um concentrador de tensões.

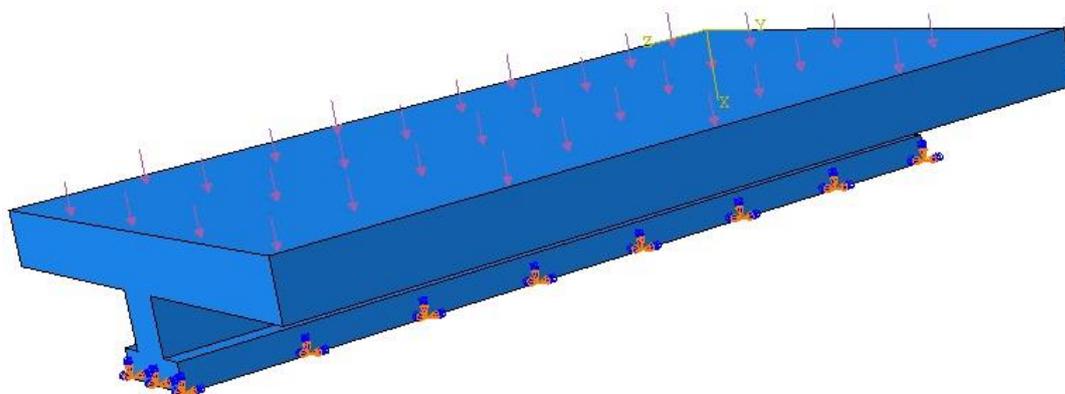


Figura 38. Forças distribuídas ao longo da área de contato do anteparo e engastamento da parte inferior no software ABAQUS versão 6.14-1.

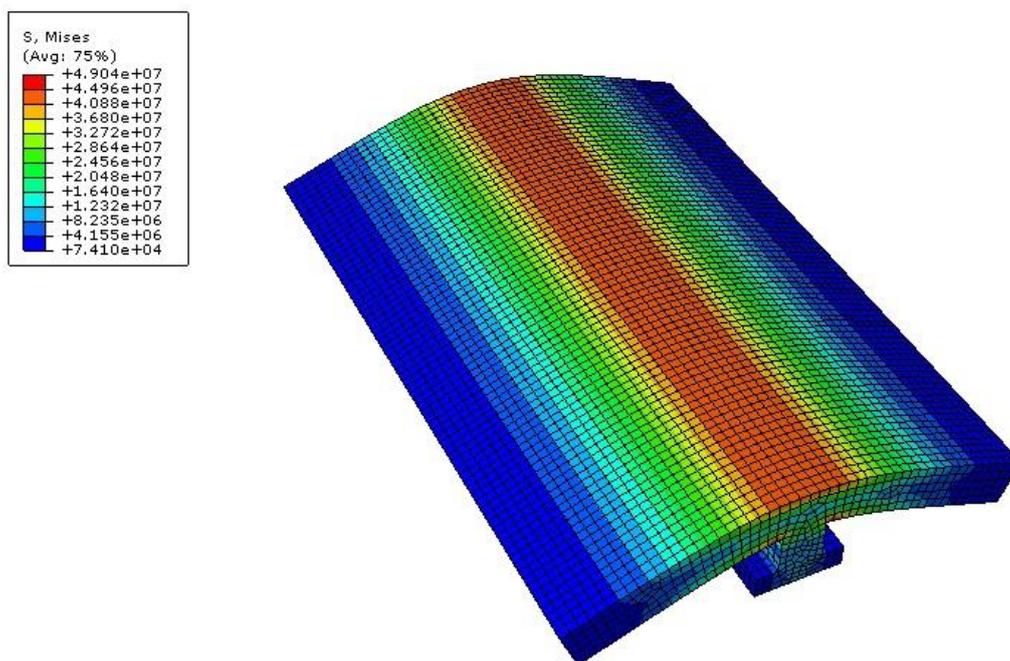


Figura 39. Campo de tensões de Von Mises obtido no software ABAQUS versão 6.14-1. A figura está em escala de 15:1.

### 4.3 PROJETO DO EIXO

O eixo do britador é projetado para ser leve, o mais barato possível, rígido e resistente o suficiente para suportar os elevados torques presentes nessa aplicação. Buscamos balancear

ao máximo esses quatro fatores na hora da seleção de nosso material e concluímos que o que melhor que se encaixava para a fabricação dos eixos era o AISI 1050 normalizado que possui limite de escoamento  $\sigma_y$  de 427 MPa, e limite de resistência a tração  $\sigma_r$  de 748 MPa. Para garantirmos o sucesso de nosso projeto, devemos dimensionar o eixo contra determinados modos de falha que possam estar presentes em nossa aplicação. No caso presente, realizamos o dimensionamento estático, contra fadiga, contra deflexão linear e angular e para velocidade crítica.

O eixo deve suportar as cargas dos 4 martelos, o peso do rotor e ser resistente à torção que irá impulsionar a rocha até o anteparo.

O rotor será considerado um cilindro feito de ferro fundido, com massa específica de  $\rho$  igual a 8000 Kg/m<sup>3</sup>.

Tabela 14. Cargas suportadas pelo eixo.

Elementos	Massa	Peso
Martelos (4)	4x450 kg	17.658 N
Rotor	15.618 kg	153.213 N
Eixo	7.701 kg	75.547 N
Total	25.119 kg	246.418N

#### 4.3.1 ANÁLISE ESTÁTICA

A determinação do diâmetro necessário do eixo para satisfazer o critério de von Mises, segundo a equação a seguir.

$$d = \left[ \frac{16FS}{\pi\sigma_y} (4M^2 + 3T^2)^{\frac{1}{2}} \right]^{\frac{1}{3}} \quad (27)$$

Onde  $\sigma_y$  é o limite de resistência ao escoamento,  $M$  o momento fletor máximo ao qual o eixo está sujeito,  $T$  o torque aplicado no eixo e FS o fator de segurança.

### 4.3.2 ANÁLISE DE FADIGA

O dimensionamento dos eixos para resistência à fadiga foi feito seguindo o método DE-ASME Elíptico. Para a aplicação do método foi feita a análise das seções críticas para que o dimensionamento do eixo fosse feito a partir da seção mais suscetível a falha. A partir da definição da seção crítica usa a equação fornecida pelo método DE-ASME Elíptico.

$$d = \left\{ \frac{16FS}{\pi} \left[ 4 \left( \frac{K_F M_a}{S_e} \right)^2 + 3 \left( \frac{K_{FS} T_a}{S_e} \right)^2 + 4 \left( \frac{K_F M_m}{S_y} \right)^2 + 3 \left( \frac{K_{FS} T_m}{S_y} \right)^2 \right]^{\frac{1}{2}} \right\}^{\frac{1}{3}} \quad (28)$$

Onde FS é o fator de segurança;  $K_F$  e  $K_{FS}$  são os fatores de concentração de tensão de fadiga, que variam conforme o tipo entalhe presente no eixo;  $M_a$  e  $M_m$  são os momentos alternados e médios, respectivamente;  $T_a$  e  $T_m$  são os torques alternados e médios, respectivamente;  $S_e$  é o limite de resistência a fadiga modificado; e  $S_y$  é o limite de resistência ao escoamento. Para o nosso caso em específico, somente encontramos momento alternado e torque médio, o que simplifica a equação anterior.

Para o cálculo do limite de resistência a fadiga, existem alguns fatores que devem ser considerados como fatores modificadores. *Marin* apresentou seis fatores modificadores e esses estão apresentados abaixo:

- Fator de Superfície  $k_a$

O fator de superfície procura caracterizar o efeito que o tipo de acabamento da superfície da peça possui sobre a resistência à fadiga e pode ser calculado pela equação a seguir, onde os fatores  $a$  e  $b$  são encontrados em tabela e variam de acordo com o tipo de acabamento dado ao eixo, e  $\sigma_r$  é a limite de ruptura.

$$k_a = a\sigma_r^b \quad (29)$$

Para o nosso projeto, o acabamento escolhido foi o usinado e os valores dos fatores são:  $a = 4,51$  e  $b = -0,251$ .

- Fator de Tamanho  $k_b$

O fator de tamanho foi calculado de maneira iterativa, até obtermos um resultado final. Os cálculos ocorreram a partir da fórmula a seguir, sendo  $d$  o diâmetro do eixo em milímetros.

$$k_b = \begin{cases} 1,24d^{-0,107} & 2,79 \leq d \leq 51 \text{ mm} \\ 1,51d^{-0,157} & 51 \leq d \leq 254 \text{ mm} \end{cases} \quad (30)$$

- Fator de Carregamento  $k_c$

É o fator que modifica a resistência à fadiga, de acordo com o tipo de carregamento em questão. Para o carregamento de torção combinado com o de flexão, utilizamos um valor unitário para o fator:

$$k_c = 1 \quad (31)$$

- Fator de Temperatura  $k_d$

Esse fator compara a temperatura de operação do componente com a temperatura ambiente, é dado pela razão entre a resistência à tração na temperatura de operação e a resistência à tração na temperatura ambiente. Para o nosso projeto, temos o fator com valor unitário:

$$k_d = 1 \quad (32)$$

- Fator de Confiabilidade  $k_e$

Considera o espalhamento de dados obtidos experimentalmente. A partir de um valor de confiabilidade, o fator é obtido através de consulta direta na tabela ou interpolação de valores. Adotamos uma confiabilidade de 99,9%, e por tabela, temos que:

$$k_e = 0,753 \quad (33)$$

- Efeito de Fatores Diversos  $k_f$

Caso exista algum outro efeito, este deverá ser considerado, e atuará como um amplificador de fatores. Para o projeto, esse fator tem valor unitário.

$$k_f = 1 \quad (34)$$

- Limite de Resistencia a Fadiga  $Se'$

O limite de resistência à fadiga do material é determinado a partir do limite de resistência à tração experimental do mesmo:

$$Se' = 0,504 * Sut \quad \text{para} \quad Sut \leq 1400 \text{ MPa} \quad (35)$$

$$Se' = 700 \text{ MPa} \quad \text{para} \quad Sut > 1400 \text{ MPa} \quad (36)$$

- Limite de Resistencia a Fadiga Modificado ( $Se$ )

Consideramos todos os fatores abordados por Marin até então e calculamos o  $Se$  modificado, a partir da equação a seguir:

$$S_e = k_a k_b k_c k_d k_e k_f S'_e \quad (37)$$

### 4.3.3 ANÁLISE DE DEFLEXÃO LINEAR

Para o dimensionamento contra deflexão linear, optamos por uma deflexão angular máxima ( $\theta$ ) de 0,0005 rad, devido ao fato de haver engrenamento. Sendo assim, utilizamos as fórmulas a seguir para as deflexões no mancal direito e esquerdo:

- Mancal esquerdo:

$$d_{esq} = \sqrt[4]{\left[\left(\frac{32n_d}{3\pi E l \theta}\right) \left( \sum F_i a_i l^2 \right) + \left( \sum F_e (b_i^3 - b_i l^2) \right)\right]} \quad (38)$$

- Mancal direito:

$$d_{dir} = \sqrt[4]{\left[\left(\frac{32n_d}{3\pi E l \theta}\right) \left( \sum F_i (-l^3 - 2l^2 + 4a_i l) \right) + \left( \sum F_e (a_i^3 l + 2a_i l^2 - a_i^3) \right)\right]} \quad (39)$$

Sendo que  $F_i$  as forças desbalanceadas,  $F_e$  as forças centralizadas,  $a_i$  a distância em relação ao mancal esquerdo,  $l$  a distância entre os mancais,  $b_i$  a distância em relação ao mancal direito,  $E$  o módulo de elasticidade,  $\theta$  o ângulo máximo admissível, e  $n_d$  o fator de segurança.

### 4.3.4 ANÁLISE DE DEFLEXÃO ANGULAR

Para esse dimensionamento, o ângulo de torção admissível foi estabelecido como sendo de 3 graus por metro linear. O diâmetro pode ser calculado a partir da seguinte equação:

$$d = \left( \frac{583.6 * T * L}{G * \theta} \right)^{0.25} \quad (40)$$

Onde L é o comprimento total do eixo,  $\theta$  é o ângulo de torção admissível em graus, G é o módulo de cisalhamento e T é o torque ao qual o eixo está submetido.

#### 4.3.5 VELOCIDADE CRÍTICA

A primeira velocidade crítica no eixo será calculada considerando o peso do eixo e o deslocamento provocado pela carga em balanço. E será obtida pela soma vetorial dos inversos das velocidades críticas encontradas para cada situação falada acima.

$$\omega = \left[ \left( \frac{1}{\omega_{peso}} \right)^2 + \left( \frac{1}{\omega_n} \right)^2 \right] \quad (41)$$

A velocidade crítica devido ao deslocamento provocado pela carga pode ser calculada por:

$$w_n = \sqrt{\frac{g}{\delta_{est}}} \quad (42)$$

Onde  $\omega_n$  é a velocidade critica relativa ao deslocamento provocado pela carga,  $g$  é a gravidade local, que foi utilizada como 9,82 m-s<sup>2</sup> e  $\delta_{est}$  é o deslocamento da linha elástica no ponto crítico.

$$\delta_{est} = \frac{-F * a^2 * (l + a)}{3 * E * I} \quad (43)$$

Onde F é a carga aplicada no eixo no ponto crítico;  $a$  é a distância do mancal até a força aplicada;  $l$  é a distância entre os mancais; I é o momento de inércia; e E é o módulo de elasticidade do material utilizado para o eixo.

A velocidade crítica devido ao próprio peso é calculada da seguinte forma:

$$\omega_{peso} = \left( \frac{\pi}{L_{total}} \right)^2 + \left( \frac{gEI}{A_t \gamma} \right)^{\frac{1}{2}} \quad (44)$$

Onde  $L_{total}$  é o comprimento total do eixo,  $A_t$  é a área transversal da seção do eixo; e  $\gamma$  é o peso específico do eixo.

#### 4.3.6 DIMENSIONAMENTO DO EIXO

O comprimento do eixo foi determinado a partir das dimensões do acoplamento, a folga entre o acoplamento e o mancal, largura dos próprios rolamentos e folga entre os rolamentos. Os esforços fletores e torçores foram determinados através do diagrama de corpo livre e da análise energética.

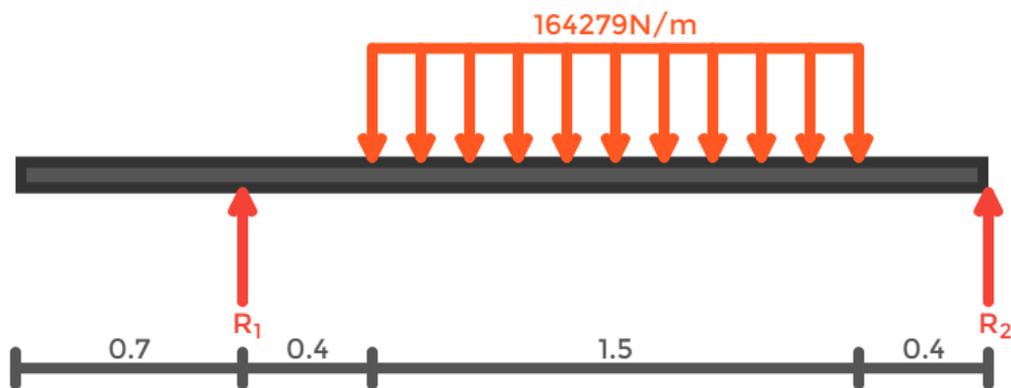


Figura 40. DCL do eixo.

Nos primeiros 200 mm do eixo está presente a polia selecionada, após ele estão presentes primeiro mancal, logo em seguida, o rotor e, por fim o último mancal. A força de  $F_2$  é igual a 3.060 N é o peso do próprio eixo e a força de 232.380 N.m é a soma dos pesos do rotor e dos 4 martelos que serão sustentados pelos eixos.

Para dimensionar o eixo corretamente, devemos considerar todos os possíveis pontos críticos, levando em consideração os maiores esforços fletores e torçores e também os concentradores de tensão devido a rasgos de anel de retenção e às estrias. Sendo assim, obtivemos uma representação esquemática do eixo.

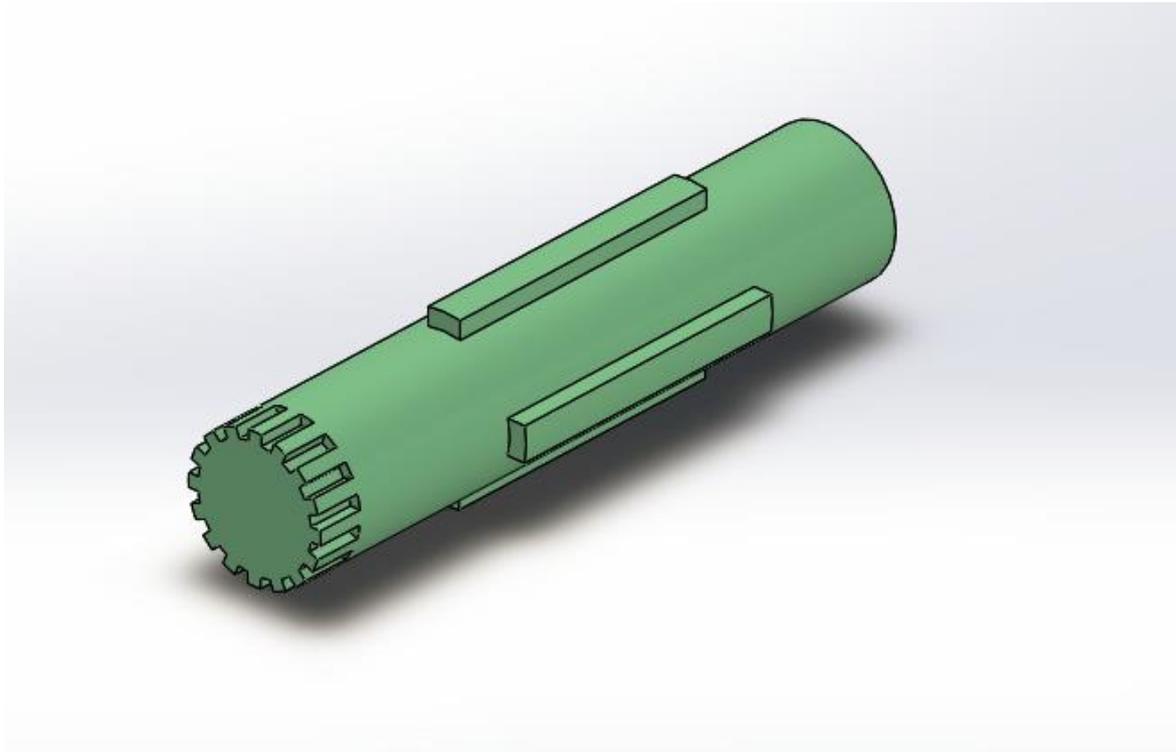


Figura 41. Representação esquemática do eixo.

Como os concentradores de tensão para fadiga são maiores na estria do que nos rasgos de anel, adotamos o  $K_f$  e o  $K_{fs}$  para as estrias e analisamos as estrias, que nesse caso, será a seção crítica. Consideramos o torque presente no eixo, que é constante para todo ele e consideramos também o maior momento fletor obtido através do diagrama de momento fletor, Figura 43.

#### 4.3.7 CÁLCULO DAS REAÇÕES NOS APOIOS

Para encontrarmos as reações nos apoios, é necessário verificar o equilíbrio de forças na vertical, para garantir que a viga não vai se mover nem para cima nem para baixo, e o equilíbrio de momentos, para garantir que a viga não irá girar. O diagrama de corpo livre da viga é: Portanto, fazendo o equilíbrio de forças na vertical, encontra-se:

$$\sum F_y = 0 \quad (45)$$

$$W_1 - R_1 - R_2 = 0 \quad (46)$$

Em que:

- R representa as reações;
- W representa a força total causada por uma força distribuída.

Para calcular a esta força total se calcula a área abaixo da carga distribuída, portanto para a Carga 1 retangular:

$$W_1 = w (x_f - x_i) \quad (47)$$

$$W_1 = 164279 [(2,6) - (1,1)] = 246.418 \text{ N} \quad (48)$$

Em que  $x_i$  e  $x_f$  representam a posição inicial e final de aplicação da carga, respectivamente, e  $w_i$  e  $w_f$ , os valores, em N/m, iniciais e finais da carga distribuída. Portanto, substituindo os valores numéricos, encontra-se:

$$R_1 + R_2 = 246.418 \text{ N} \quad (49)$$

Fazendo o equilíbrio dos momentos no primeiro apoio, encontra-se:

$$\sum M = 0 \quad (50)$$

$$R_2 (x_{\text{apoio 2}} - x_{\text{apoio 1}}) - W_1 (\bar{x}_{\text{força 1}} - x_{\text{apoio 1}}) = 0 \quad (51)$$

Em que  $\bar{x}$  representa a posição de aplicação equivalente da carga distribuída, que é o centróide da geometria, calculado como:

Carga 1, retangular:

$$\bar{x} = \frac{x_i + x_f}{2} = \frac{1,1 + 2,6}{2} = 1,85 \text{ m} \quad (52)$$

Substituindo os valores numéricos, encontra-se:

$$R_2 \cdot (3 - 0,7) = + (246.418) \cdot (1,85 - 0,7) \quad (53)$$

$$2,3R_2 = 283.381 \text{ N} \quad (54)$$

Das duas equações, encontra-se o seguinte sistema:

$$R_1 + R_2 = 246.418 \text{ N} \quad (55)$$

$$2,3R_2 = 283.381 \text{ N} \quad (56)$$

Resolvendo o sistema, encontra-se:

$$R_1 = 123.209 \text{ N} \quad (57)$$

$$R_2 = 123.209 \text{ N} \quad (58)$$



Figura 42 . Diagrama de esforço cortante do eixo.

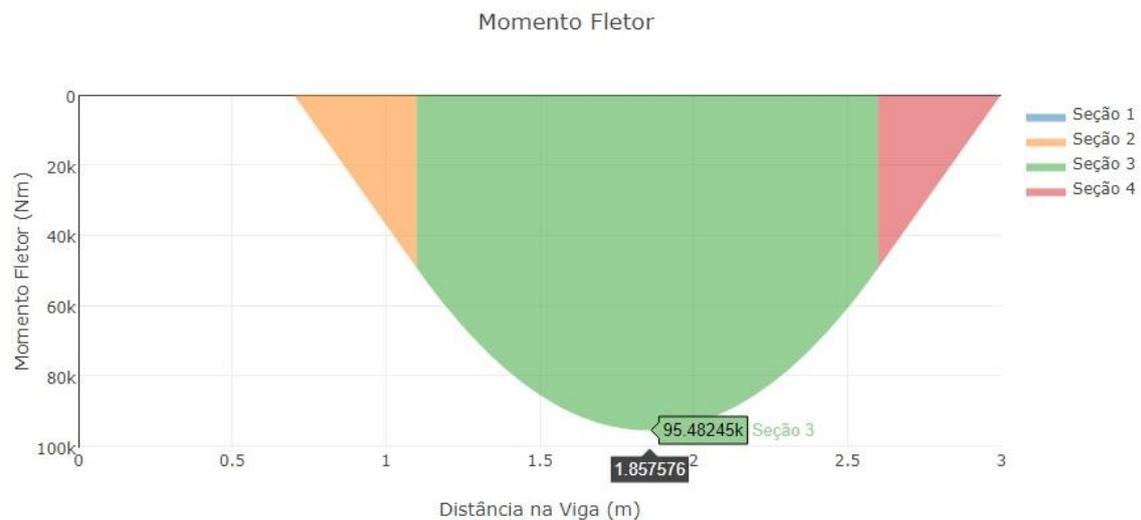


Figura 43. Diagrama de momento fletor do eixo.

A partir do gráfico de momento fletor apresentado acima, que contém 95.482 N.m como fletor máximo e sabendo que o valor do momento torçor é constante para o eixo e igual a 738.000 N.m (obtido pela multiplicação da força de 738.000 N pela distância, 1m, do ponto de aplicação da carga até o centro do eixo) temos os resultados obtidos abaixo:

Tabela 15. Fatores para dimensionamento do eixo.

Fator de acabamento (ka)	0.8567	Concentrador de tensão (Kf)	2.3
Fator de tamanho (kb)	0.8715	Concentrador de tensão (Kfs)	2.5
Fator de carregamento (kc)	1	Limite de resistência a fadiga (Se')	376.99
Fator de temperatura (kd)	1	Limite de resistência a fadiga novo (Se)	218.98
Fator de confiabilidade (ke)	0.753	Limite de escoamento (Sy)	427
Fator efeitos diversos (kf)	1	Limite de resistência a tração (Sut)	748

Tabela 16. Resultados obtidos para o eixo.

Modo de falha	Diâmetro do eixo (mm)
Estático	313,60
Fadiga	707,00
Fadiga corrigido	726,90
Deflexão linear mancal direito	387,10
Deflexão linear mancal esquerdo	398,70

Para facilitar o processo iterativo de cálculo, foi criado um programa para determinação do diâmetro do eixo considerando 4 teorias, disponível no anexo 1.

Sendo assim, escolhemos um diâmetro de 730 mm por se enquadrar em todos os modos de falha. Além do cálculo do diâmetro, determinamos a velocidade crítica do eixo como sendo 16.584 rpm, percebendo que a mesma se encontra muito acima da velocidade real de operação do eixo (480 rpm), sendo, portanto, um projeto seguro em todos os aspectos.

## 5 SELEÇÃO DOS COMPONENTES E FABRICAÇÃO

*Este capítulo descreve os procedimentos utilizados para selecionar o motor elétrico, redutor, as polias, correias, rolamentos, anéis de retenção e acoplamento utilizados pelo britador. Descreve também os processos de fabricação do rotor, martelo, eixo e anteparo, assim como as tolerâncias e ajustes para fabricação dos mesmos.*

### 5.1 COMPONENTES

O sistema de acionamento da máquina é composto de um motor elétrico que fornece a potência e torque necessário a um redutor que possui uma polia acoplada ao seu eixo de saída, sendo essa polia responsável por transmitir torque ao eixo do rotor através de correias. Esse tipo de transmissão foi escolhido devido a sua economia proporcionada através da sua grande versatilidade (permitem grandes variações de velocidade), segurança, facilidade de manutenção, ausência de lubrificante, durabilidade quando adequadamente projetada e instalada. Os choques não são transmitidos aos motores, eixos e mancais devido à elasticidade da correia, a correia atua como um elemento amortecedor das sobrecargas pela possibilidade de deslizamento.

A polia motora (conectada ao eixo do motor elétrico por meio de chaveta) terá menor diâmetro quando comparada a polia movida (ligada através de 16 estrias a ponta do eixo rotor do britador), isso é justificado devido a alto torque requerido pelo eixo rotor.

Na referida máquina são também utilizados mancais de rolamento, elementos de máquinas que servem para apoiar fixamente, posicionar e suportar esforços transmitidos dos elementos dotados de movimentos giratórios (eixo rotor) aos mancais. Além dessas funções, os mancais de rolamentos também atenuam ao máximo possíveis efeitos nocivos de atrito entre a superfície dos eixos girantes e dos seus apoios.

Por fim são apresentados os dados dos anéis de retenção selecionados e o dimensionamento da chaveta ligada ao eixo do motor elétrico. A seguir são apresentadas as metodologias utilizadas para a seleção de cada um dos componentes descritos anteriormente.

## 5.2 SELEÇÃO DOS PARAFUSOS DE FIXAÇÃO

A montagem ocorrerá com parafusos UNF (rosca fina), geralmente utilizados com a finalidade de fixação removível. Serão utilizados 14 parafusos em cada uma das 4 uniões, cada uma com dois quartos do rotor e um martelo, de acordo com a Figura 44.

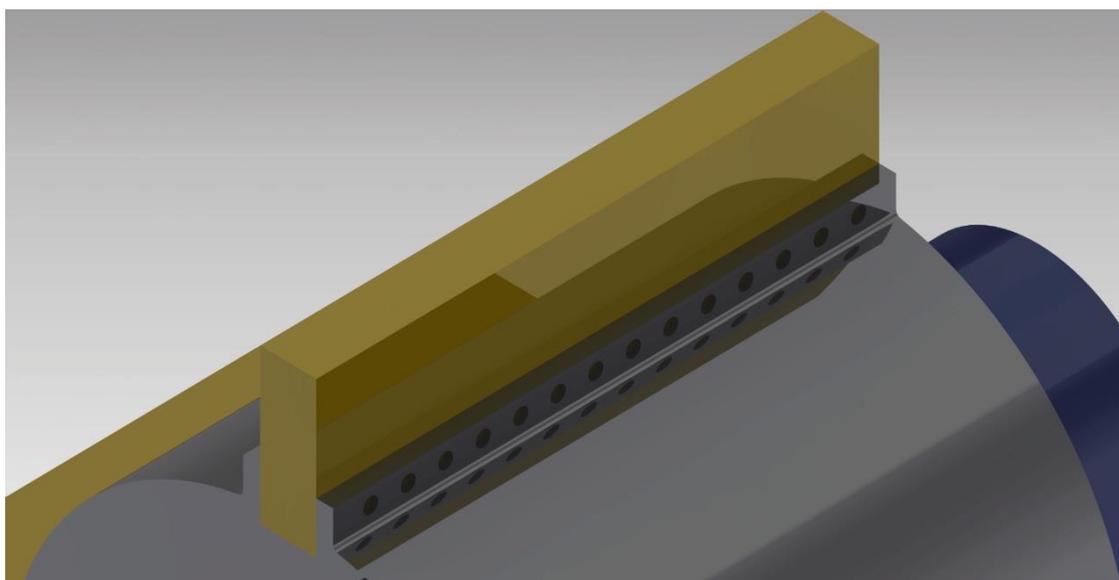


Figura 44. Disposição dos 14 parafusos na montagem do rotor.

Decidiu-se pela adoção de parafusos de cabeça sextavada para os parafusos pelos altos torques empregados na montagem (pré-carga dos parafusos). A Figura 45 exibe o diagrama de corpo livre do parafuso.

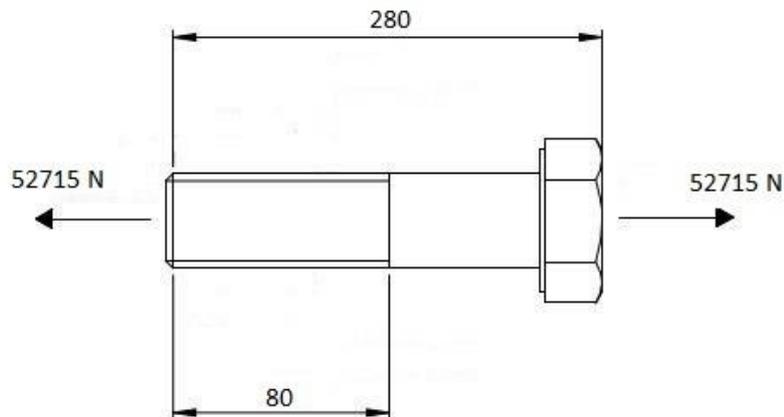


Figura 45. Diagrama de corpo livre dos parafusos da união dos rotores com os martelos. O traço interno indica a presença de rosca. Fora de escala.

A carga externa foi encontrada dividindo os 738000 N, força encontrada na análise de forças necessária para reduzir uma rocha de 500 mm para outras de 10 mm, entre os 14 parafusos de cada união, encontrando, assim, 52715 N.

Foi proposta uma pré-carga de 75% da resistência de prova para garantir o posicionamento correto do sistema e minimizar o efeito de eventuais folgas pela vibração do sistema. Com base em restrições dimensionais da carcaça e no material selecionado, os diâmetros nominais dos parafusos foram pré-selecionados. Verificou-se então se o fator de segurança mínimo foi atingido com a seleção.

A Tabela 17 apresenta as decisões acerca do material e dos diâmetros nominais, bem como dos comprimentos dos parafusos empregados na caixa redutora.

Tabela 17. Informações gerais preliminares sobre os parafusos pré-selecionados :(BUDYNAS; NISBETT, 2016)

Parafuso	União do Martelo com o Rotor
Material	Liga Q&T (Temperada e revenida)
Categoria de propriedade	12,9
Resistência de Prova ( $S_t$ )	970 MPa
Módulo de elasticidade (E)	207 GPa
Especificação do parafuso	M 20x1,5 (UNF -Passo fino)
Diâmetro Nominal (d)	20 mm
Passo ( p )	1,5 mm
Comprimento total ( L )	280 mm
Comprimento rosqueado ( $L_t$ )	80 mm

Com a pré-seleção, todos os dados necessários foram obtidos. A pré-carga, de 75% da resistência de prova dos parafusos, foi calculada como:

$$F_i = 0,75 \cdot S_t \cdot A_t \quad (59)$$

Tabela 18. Dados do parafuso selecionado.

Parafuso pré-selecionado	$F_i =$ Pré-carga [N]
M 20x1,5	197.880

Onde,  $A_t = 272 \text{ mm}^2$  (M 20x1,5) é a área equivalente sob tração dos parafusos que estão definidas na página 388 do Shigley (BUDYNAS; NISBETT, 2016), tabela 8-1. Vale ressaltar que a pré-carga será aplicada em cada um dos 56 parafusos.

Para essa aplicação, o parafuso não estará sujeito à forças cisalhantes.

Para calcular a porcentagem de força absorvida por cada parte da junção, é necessário calcular o coeficiente de fração de carga, definido por:

$$C = \frac{k_b}{k_b + k_m} \quad (60)$$

Em que  $k_b$  é a rigidez do parafuso e  $k_m$  é a rigidez da junta. A rigidez dos parafusos foi calculada:

$$k_b = \frac{A_d A_t E}{A_d L_t + A_t L_d} \quad (61)$$

Tabela 19. Rigidez do parafuso.

Parafuso pré-selecionado	$k_b =$ Rigidez do parafuso [ $\frac{N}{mm}$ ]
M 20x1,5	606.874

Foi realizado o procedimento sugerido por (BUDYNAS; NISBETT, 2016) na página 401, tabela 8-7.

Para calcular a rigidez da junta foi adotado pelo grupo que o material da carcaça seja o mesmo da fabricação do parafuso, para fins de simplificação. Os coeficientes A e B foram tomados para o aço da tabela 8-8 de (BUDYNAS; NISBETT, 2016).

$$k_m = EdAe^{Bd/L} \quad (62)$$

Tabela 20. Rigidez do material.

Parafuso pré-selecionado	$K_m =$ Rigidez do material [ $\frac{N}{mm}$ ]
M 20x1,5	3.684.600

L representa o comprimento solicitado do parafuso. Com os valores em mãos, os coeficientes de fração de carga foram calculados como:

Tabela 21. Coeficiente de fração da carga.

Parafuso pré-selecionado	C = Coeficiente de fração de carga
M 20x1,5	0,141413

Considerando que um maior C significa maior absorção da carga pelo parafuso, o maior deles, para uma junção com peças de aço, foi tomado.

Com os valores de C e  $F_i$ , determinar o fator de segurança contra a separação da junção ( $n_o$ ) foi imediato.

$$n_o = \frac{F_i}{P(1 - C)} \quad (63)$$

Tabela 22. Fator de segurança contra separação da junta.

Parafuso pré-selecionado	$n_o$ = Fator de segurança contra a separação da junção
M 20x1,5	4,37

Os fatores de segurança contra o escoamento dos parafusos foram determinados considerando as tensões atuantes devido à pré-carga e à carga externa (P). As tensões atuantes nos parafusos, com base nas áreas resistivas são dadas por:

$$\sigma_b = \frac{CP + F_i}{A_t} \quad (64)$$

e

$$\tau_b = \frac{F_s}{A_r} \quad (65)$$

Tabela 23. Tensão devido a pré-carga no parafuso selecionado.

Parafuso pré-selecionado	$\sigma_b$ = Tensão devido à pré-carga
M 20x1,5	755 MPa

Aqui,  $A_r$  é a área calculada pelo diâmetro interno da rosca e  $F_s$ , a força cisalhante que solicita cada parafuso, que é nula para essa aplicação. Da equação da energia de distorção (Von Mises), temos:

$$\sigma_e = \sqrt{\sigma_b^2 + \tau_b^2} \quad (66)$$

Tabela 24. Tensões equivalentes para o parafuso pré-selecionados.

Parafuso pré-selecionado	$\sigma_e$ = Tensão equivalente
M 20x1,5	755 MPa

Ao se comparar a tensão equivalente de Von Mises com a resistência de prova, obtém-se os fatores de segurança ao escoamento dos parafusos.

$$n_s = \frac{S_t}{\sigma_e} \quad (67)$$

Tabela 25. Fator de segurança.

Parafuso pré-selecionado	$n_s$ = Fator de segurança para os parafusos pré-selecionados
M 20x1,5	1,28

Sendo assim, a pré-seleção foi aceita, com coeficiente de segurança de 1,25. A Tabela 26 exhibe as especificações e quantidades de parafusos a serem utilizados na montagem do britador.

Tabela 26. Especificações da seleção final de parafusos.

Parafuso	União do martelo com rotor
Material	Liga Q&T (Temperada e revenida)
Categoria de propriedade	12,9
Especificação do parafuso	M 20x1,5 (Passo fino)
Quantidade	56

### 5.3 MOTOR ELÉTRICO E REDUTOR

Segundo as características de projeto, o motor elétrico deve fornecer uma potência específica ao eixo do britador que está ligado a uma polia. No eixo do britador é requerido alto torque, fato que se faz necessário o uso de um redutor acoplado ao motor elétrico, pois apenas o motor não teria condições de fornecer o torque necessário. A potência requerida do motor é obtida com base nas perdas nas transmissões por correias, já que consideramos desprezíveis as perdas no acoplamento. A eficiência da transmissão por correias é definida em 98% para cada correia. A partir da definição das eficiências, o valor da potência nominal requerida ao motor pode ser determinado. Portanto, para que se defina a potência necessária ao motor, e, portanto, ao eixo “a” (eixo do britador) e a potência no eixo do britador ( $H_a$ ), deve-se estimar as referidas perdas e adicioná-las ao valor da potência no eixo do motor ( $H_c$ ). Essa estimativa será feita com base na Tabela 27.

Tabela 27. Rendimentos recomendados (ANTUNES, 2000)

Rendimentos recomendados	
Transmissão por parafuso sem fim	$0,50 \leq \eta_{psf} \leq 0,95$
Transmissão por engrenagens cilíndricas	$0,97 \leq \eta_e \leq 0,98$
Transmissão por correntes	$0,97 \leq \eta_{cr} \leq 0,98$
Transmissão por correias	$0,96 \leq \eta_c \leq 0,98$
Transmissão por rodas de atrito	$0,95 \leq \eta_{ra} \leq 0,98$
Transmissão por deslizamento (par)	$0,96 \leq \eta_m \leq 0,98$
Transmissão por rolamentos (par)	$0,98 \leq \eta_{prol} \leq 0,99$

As perdas internas no motor foram desprezadas e a eficiência da transmissão por correias foi definida em 98% para cada correia. O cálculo da potência requerida pelo motor foi esboçado a seguir.

Em função disso, a eficiência total do sistema redutor é dada por:

$$\eta_t = \eta_c^{N1} = 0,98^1 = 0,98 \quad (68)$$

Em que,  $\eta_t$  é a eficiência total,  $\eta_c$  é a eficiência de cada transmissão por correia e N1 número de transmissão por correia, T é o torque no eixo rotor,  $n_{eixo\ rotor}$  é a rotação do eixo do rotor.

A potência no eixo do rotor ( $H_a$ ) em kW é calculada da seguinte forma:

$$H_a = \frac{n_{eixo\ rotor} \cdot T}{9549,27} = \frac{480.738000}{9549,27} = 37096 \text{ kW} \quad (69)$$

$$H_a = \frac{H_c}{\eta_t} = \frac{37096}{0,98} = 37853 \text{ kW} \quad (70)$$

Consultando os catálogos de fabricantes de motores elétricos, obteve-se alguns modelos apropriados para aplicação em mineração, sendo escolhido o motor da linha HGF fabricado pela WEG com potência de 2982,8 kW e com velocidade de rotação nominal de 1920 rpm. A partir da definição das eficiências, o valor da potência nominal requerida ao eixo do rotor é de aproximadamente 37853 kW. Sendo assim, faz-se necessário a escolha de um motor trifásico de corrente alternada síncrono de 4 polos com potência nominal de 38.000 kW para que possa

fornecer no mínimo este valor de potência no eixo do britador. Esse tipo de motor foi escolhido por sua capacidade de manter velocidade constante, possuir alto rendimento, alta capacidade de torque e manutenção reduzida. A partir do valor de potência determinado foi escolhido um motor trifásico síncrono - Linha SM40 do fabricante Weg que opera até 50 kW de potência.

Tabela 28. Características do motor selecionado (WEG, 2016).

Características do Motor Trifásico de Indução Linha HGF		
Potência	Rotação	Tensões
2982,8 kW (4000 cv)	1920 rpm	380 até 6600 V

Na Figura 46 é ilustrado o motor selecionado.



Figura 46. Ilustração do modelo de motor selecionado (WEG, 2016).

O redutor selecionado para ser responsável pela maior parcela da redução necessária será do modelo 300M da fabricante Bonfiglioli. As características do redutor são mostradas na Tabela 29.

Tabela 29. Características do redutor selecionado (BONFIGLIOLI, 2010).

Características do Redutor modelo 300M		
Faixas de redução	Rotação admissível	Eixo de saída
1250 a 128.600 N.m	500 a 2000 rpm	Chaveado sólida, estriado, oco estriado

Na Figura 47 é ilustrado o redutor selecionado.



Figura 47. Redutor selecionado (BONFIGLIOLI, 2010).

## 5.4 CORREIAS E POLIAS

As correias utilizadas serão de perfil em “V”. Tal perfil foi escolhido por permitir grandes relações de transmissão, possuir baixo valor de manutenção, não patinar facilmente, serem silenciosas e absorver choques, fato que diminui os esforços sobre máquina.

O procedimento para a seleção da correia “V” mais adequada segue uma sequência. Primeiramente é determinada a potência de projeto:

$$H_{projeto} = \frac{n_{eixo\ rotor} \cdot T}{9549,27} = \frac{480.738000}{9549,27} = 37096\ kW \quad (71)$$

Onde:

- $H_{projeto}$  é a potência (kW) que deve ser fornecida ao eixo do rotor;
- $n_{eixo\ rotor}$  é a rotação em rpm do eixo rotor;
- $T$  é o torque presente no eixo rotor.

Na equação seguinte é calculada a potência efetiva multiplicando a potência do motor pelo o fator de serviço ( $k_s$ ), tal fator foi obtido consultando a tabela abaixo, considerando serviço

pesado, a presença de choques fortes na máquina, motor de corrente alternada de alto binário, motor de arranque.

$$H_{\text{efetiva}} = H_{\text{motor}} \cdot k_s = 2982,8 \text{ kW} \cdot 1,7 = 5070,76 \text{ kW} \quad (72)$$

Onde:

- $H_{\text{efetiva}}$  (kW) é a potência efetiva do motor elétrico;
- $K_s$  é o fator de serviço;

A seção mais adequada é a Micro “V” pois é a seção recomendada para uso em equipamentos de britagem e para altas faixas de potência. É determinado um diâmetro para a polia do eixo rotor, conforme segue abaixo:

$$\frac{n_{\text{reductor}}}{n_{\text{eixo rotor}}} = \frac{D_{\text{polia rotor}}}{d_{\text{polia reductor}}} \quad (73)$$

Foi sugerido um diâmetro de 250 mm para a polia que se encontra no eixo de saída do reductor ( $d_{\text{polia reductor}}$ ) e sabendo a rotação do eixo rotor (480 rpm) e eixo do motor (250 rpm) é possível determinar o diâmetro da polia do eixo rotor. Esse valor está dentro da faixa recomendada de diâmetro de polia menor, de acordo com a tabela.

$$D_{\text{rotor}} = \frac{720}{480} \cdot 250 = 375 \text{ mm} \quad (74)$$

Onde:

- $D_{\text{polia rotor}}$  é o diâmetro da polia do rotor (mm);
- $n_{\text{reductor}}$  é a rotação em rpm do eixo de saída do reductor (rpm).

Para correias em “V” tem-se que a distância entre os centros das polias é determinada a partir:

$$D_{\text{polia rotor}} < C < 3(D_{\text{polia rotor}} + d_{\text{polia motor}}) \quad (75)$$

$$375 \text{ mm} < C < 625 \text{ mm} \quad (76)$$

Onde:

- C é a distância entre os centros das polias (mm).

Foi escolhido um valor para a distância entre centros que estivesse no intervalo acima, sendo esse valor igual a 500 mm. Com o valor da distância de centro, calculamos o comprimento da correia.

$$L_p = 2C + \pi \left[ \left( \frac{D_{polia \text{ rotor}} + d_{polia \text{ redutor}}}{2} \right) + \left( \frac{(D_{polia \text{ rotor}} - d_{polia \text{ redutor}})^2}{4C} \right) \right] \quad (77)$$

Substituindo os valores, obtemos o valor do comprimento da correia:

$$L_p = 2006,29 \text{ mm} \quad (78)$$

Consultando a tabela abaixo, a correia que tem o comprimento efetivo mais próximo do calculado é a correia Micro “V” perfil L de referência PL 2019, possuindo 2019 mm de comprimento efetivo. Com o comprimento efetivo, iremos recalculer a distância entre os centros das polias.

$$C = \frac{L_{tabelado}}{2} - \left[ \frac{\pi}{4} (D_{polia \text{ rotor}} + d_{polia \text{ motor}}) + \left( \frac{(D_{polia \text{ rotor}} - d_{polia \text{ motor}})^2}{2 L_{tabelado}} \right) \right] \quad (79)$$

Onde:

$L_{tabelado}$  é o comprimento estabelecido para a referência de correia selecionada (mm).

Substituindo os valores e calculando a nova distância entre os centros das polias, obtemos:

$$C = 515,59 \text{ mm} \quad (80)$$

A velocidade (V) em m/min da correia pode ser calculada a partir:

$$V = \frac{\pi \cdot d_{polia\ redutor} \cdot n_{reductor}}{1000} = \frac{\pi \cdot 320.720}{1000} = 723,83\ m/min \quad (81)$$

$$F_i = 1381972\ N \quad (82)$$

Onde  $F_i$  (N) é o valor da pré-carga.

O perfil da correia Micro V PL 2019 é ilustrado na Figura 48.



Figura 48. Perfil da correia Micro V série L (CATALOGO GATES, 2011).

As dimensões da polia motora são representadas na Tabela 30.

Tabela 30. Dimensões da polia motora selecionada (CORREIAS SCHNEIDER, 2008)

Dimensões Polia motora (6 frisos)					
Código	Tipo	ØC (mm)	L1 (mm)	L2 (mm)	Peso (kg)
PL-250	6W	125	33	43	11,44

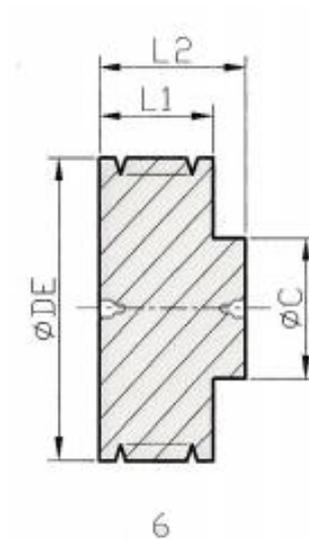


Figura 49. Representação das dimensões da polia motora (CORREIAS SCHNEIDER, 2008).

A polia movida ligada ao eixo do britador por meio de 16 estrias, possui diâmetro de 375 mm e pista com 6 frisos que possuem dimensões idênticas ao perfil da correia micro V série L.

## 5.5 ROLAMENTOS

Os rolamentos para mineração devem ser de alta precisão, pois nesse ramo as máquinas trabalham sem interrupções e com presença de vibração, sendo essas condições de trabalho muitas vezes não vantajosas, proporcionando uma vida dura para os rolamentos. Esse tipo de rolamento é apropriado para lugares úmidos e empoeirados fazendo com que haja uma maior resistência a possíveis corrosões, assim possibilitando que a máquina efetue sua atividade com durabilidade.

O tipo de rolamento recomendado para a aplicação são rolamentos autocompensadores de rolos, por suportarem cargas radiais muito grandes, cargas axiais moderadas, todas em baixa velocidade de rotação, e por corrigirem os erros de alinhamento. Normalmente fabricados com a gaiola em aço ou bronze, também fabricados com tecnologia especial para mecanismos vibratórios.

Para o dimensionamento de rolamentos seguiu-se a metodologia de cálculo a partir da vida em milhões de rotações. Sabendo-se que a vida útil do projeto é de  $10^9$  ciclos, pode-se determinar que os rolamentos deverão ter uma vida mínima de 1000 milhões de rotações.

A partir da determinação da vida em milhões de rotações encontra-se a relação entre a Capacidade de carga dos rolamentos e a carga aplicada nestes pela seguinte equação:

$$L_{Mr} = \left(\frac{C}{P}\right)^x \quad (83)$$

Em que  $L_{mr}$  é a vida em milhões de rotações,  $C$  é a Capacidade de carga do rolamento,  $P$  é a Carga aplicada no rolamento e o expoente  $x$  tem valores de: 3 para rolamentos de carreiras de esferas e  $10/3$  para rolamentos de carreiras de rolos. A seleção do tipo de mancal deve ser feita de acordo com o tipo de carga a que eles estão submetidos, sendo aconselháveis mancais de carreiras esféricas para a ausência de forças axiais e mancais de rolos cônicos para quando houver aplicação de forças axiais.

Tendo-se a relação entre a Capacidade de carga e a Carga aplicada, determina-se a Carga aplicada através da seguinte equação:

$$P = X \cdot Fr + Y \cdot Fa \quad (84)$$

Em que  $X$  e  $Y$  são coeficientes determinados de acordo com o tipo de rolamento, catalogado pelo fabricante, e as forças  $Fr$  e  $Fa$  são, respectivamente, força radial e força axial. Caso não haja força axial,  $P = Fr$ .

No caso de rolamentos de carreira de rolos cônicos, também é necessário determinar a montagem destes para que se possa determinar as forças  $Fr$  e  $Fa$ , fazendo-se por um processo iterativo, na qual dá-se um chute inicial de um tipo de mancal adequado para o diâmetro escolhido e em seguida usa-se os valores catalogados pelo fabricante para se calcular a capacidade de carga que este está submetido, fazendo-se comparações entre a capacidade de carga escolhida e a capacidade de carga até os valores convergirem.

Os rolamentos selecionados foram rígidos de uma carreira de esferas com diâmetro interno de 750 mm, fazendo-se necessário o uso de uma bucha, pois o eixo tem 730 mm de diâmetro. A força radial no mancal A, que é igual no mancal B, é de 123,209 kN, o que sugere uma Capacidade de Carga de aproximadamente 880,39 kN. Sabendo que os rolamentos são do mesmo modelo, adotou-se então um par de rolamentos modelo SKF 238/750 CAMA /W20 com capacidade de carga de 2930 kN, o que garante uma nova vida de 54947,7 milhões de rotações para ambos os mancais. A Tabela 31 apresenta as características do rolamento selecionado.

Tabela 31. Aspectos do rolamento selecionado

Características do rolamento selecionado						
Modelo do rolamento selecionado	Força radial nos mancais (kN)	Capacidade de carga necessária (kN)	Capacidade de carga do rolamento selecionado (kN)	Vida adotada em milhões de rotações	Vida em milhões de rotações do rolamento selecionado	Diâmetro interno do rolamento selecionado (mm)
SKF 238/750 CAMA /W20	123, 209	880,39	2930	1000	54947,7	750

Na Figura 50 é ilustrado um rolamento autocompensador de rolos.



Figura 50. Rolamento autocompensador de rolos (SKF BRASIL, 2018).

## 5.6 ANÉIS DE RETENÇÃO

Os anéis de retenção são usados para posicionar axialmente determinados componentes sobre o eixo, são elementos mecânicos utilizados para não permitir nenhum movimento axial de rolamentos e engrenagens, e também resistir a determinados esforços axiais, desde que os mesmos não sejam muito elevados. Existem grandes variedades de anéis de retenção disponíveis no mercado para diversos tipos de aplicação. Os mais comuns são anéis cilíndricos de pequenas espessuras, que possuem pequenas cavidades nas extremidades para permitir sua montagem através de alicates específicos. São utilizados, no geral, em ranhuras de eixos, mas podem ser empregados de outras formas.

Para tamanhos, dimensões e classificações, os catálogos de fabricantes devem ser consultados. Para este projeto, foram selecionados anéis de retenção para eixos do catálogo de fabricante SEEGER de modelo J750. As dimensões dos anéis escolhidos estão dispostas na Tabela 32.

Tabela 32. Características do anéis de retenção (SEEGGER, 2009)

Características do anel de retenção selecionado				
Código do anel	Diâmetro externo (mm)	Diâmetro interno (mm)	Espessura (mm)	Rotação admissível (rpm)
J 750	730	700	34	600

## 5.7 ESTRIAS

Para o acoplamento do eixo ao rotor e desse eixo a polia movida foi decidido a utilização de estrias em uma das extremidades do eixo, já que por mais que seus custos de fabricação sejam maiores do que os de chavetas, as estrias são recomendadas para transmissões de torques elevados. Além disso estrias apresentam um melhor alinhamento, maior estabilidade e maior resistência à fadiga do que chavetas.

Com isso, teremos que o dimensionamento de estrias será com ajuste classe B (para deslizar sem carga), com dimensões apresentadas na Tabela 33.

Tabela 33. Tipos de estrias e suas dimensões (SHIGLEY, 2011).

Tipos de estrias e dimensões							
Número de dentes nas estrias	w (para todos os ajustes)	Ajuste classe A (montagem permanente)		Ajuste classe B (para deslizar carga)		Ajuste classe C (para deslizar sem carga)	
		h	d	h	d	h	d
4	0,241 D	0,0075 D	0,850 D	0,125 D	0,750 D	—	—
6	0,250 D	0,050 D	0,900 D	0,0075 D	0,850 D	0,075 D	0,810 D
10	0,156 D	0,045 D	0,910 D	0,070 D	0,860 D	0,070 D	0,810 D
16	0,098 D	0,045 D	0,910 D	0,070 D	0,860 D	0,070 D	0,810 D

A Figura 51 representa os tipos de estrias e seus parâmetros geométricos.

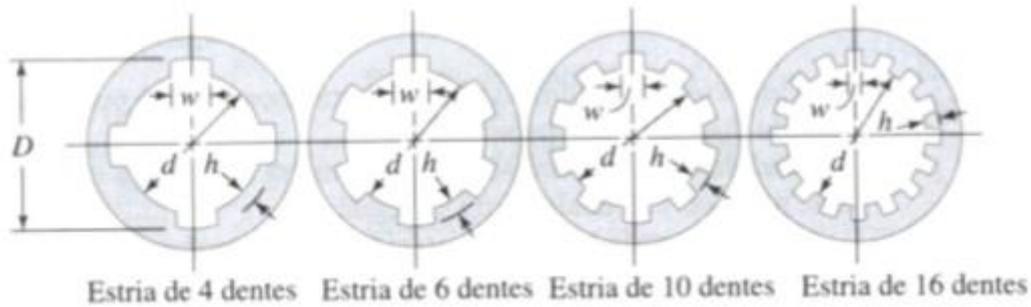


Figura 51. Tipos de estrias e parâmetros geométricos (SHIGLEY, 2011).

### 5.7.1 DIMENSIONAMENTO DAS ESTRIAS

No dimensionamento das estrias foi considerado falhas por cisalhamento e por esmagamento.

### 5.7.2 POR CISALHAMENTO

Como recomendação de segurança sabe-se que apenas 25% da área da estria está sob carga de cisalhamento, logo:

$$\tau = \frac{F}{A} \quad (85)$$

Onde F é a força tangencial (N) e A é área (mm<sup>2</sup>) é dado por:

$$A = 0.25 * \frac{\pi DL}{2} = \frac{\pi DL}{8} \quad (86)$$

Onde D é o diâmetro (mm) e L (mm) é o comprimento da estria.

Sabendo que  $F = \frac{2T}{D}$  teremos que:

$$T = \frac{\tau \pi D^2 L}{16} \quad (87)$$

Logo:

$$\tau = \frac{16T}{\pi D^2 L} \quad (88)$$

Sendo assim, podemos calcular o fator de segurança da estria contra o cisalhamento pela razão entre a tensão encontrada ( $\tau$ ) e a tensão cisalhante admissível:

$$FS_{cisa} = \frac{\tau}{\tau_{adm}} \quad (89)$$

### 5.7.3 CONTRA ESMAGAMENTO

Analogamente à forma anterior, podemos calcular a tensão contra esmagamento. Neste caso o ponto de aplicação é no raio médio ( $r_m$ ) a área projetada é dada por:

$$A = hL \quad (90)$$

$$r_m = \frac{D - h}{2} \quad (91)$$

Logo, teremos que a tensão de esmagamento é dada por:

$$\sigma = 1.33 * \frac{T}{A \cdot n \cdot r_m} = 1.33 * \frac{2T}{hLn(D - h)} \quad (92)$$

Onde  $n$  é o número de estrias.

Com isso, de forma análoga a anterior é possível calcular o fator de segurança da estria contra esmagamento através da razão entre a tensão encontrada e a tensão de esmagamento admissível do material.

$$FS_{esma} = \frac{\sigma}{\sigma_{adm}} \quad (93)$$

#### 5.7.4 RESULTADOS DAS ESTRIAS

No software Microsoft Excel são inseridos todas as equações anteriores e os valores do diâmetro do eixo, torque e comprimento aproximado para as estrias. De posse desses dados o software calcula os parâmetros apresentados na Tabela 34 e apresenta o valor mais apropriado para a dimensão h, w e d. Fazendo uma análise dos valores obtidos foi selecionado o número de dentes de estrias, e determinado seu comprimento e fatores de segurança. A região do eixo que é acoplada a polia motora irá possuir 16 estrias, tendo dimensões conforme a última linha da Tabela 34.

Tabela 34. Resultados dos parâmetros calculados para as estrias ligadas a polia movida na extremidade do eixo rotor.

Classe B										
N° Estrias	w	h	d	T	$\sigma$	Tadm	$\sigma$ adm	FS(cisa.)	FS(esma)	L
4	175,93	91,25	547,5	35,28344	197,9722	427	748	12,10199	3,778308	200
6	182,5	54,75	620,5	35,28344	192,7624	427	748	12,10199	3,880425	
10	113,88	51,1	627,8	35,28344	127,8354	427	748	12,10199	5,851274	
16	71,54	51,1	627,8	35,28344	79,897	427	748	12,10199	9,362054	

A região do eixo que entra em contato com rotor irá possuir 4 estrias e os resultados são apresentados na primeira linha da Tabela 35.

Tabela 35. Resultados dos parâmetros calculados para as estrias ligadas a polia movida na extremidade do eixo rotor.

Classe B										
N° Estrias	w	h	d	T	$\sigma$	Tadm	$\sigma$ adm	FS(cisa.)	FS(esma)	L
4	175,93	91,25	547,5	35,28344	197,9722	427	748	12,10199	3,778308	1500
6	182,5	54,75	620,5	35,28344	192,7624	427	748	12,10199	3,880425	
10	113,88	51,1	627,8	35,28344	127,8354	427	748	12,10199	5,851274	
16	71,54	51,1	627,8	35,28344	79,897	427	748	12,10199	9,362054	

## 5.8 ACOPLAMENTO ELÁSTICO

A seleção dos acoplamentos foi feita com auxílio de algoritmo computacional para cálculo do momento de torção máxima e, a partir do valor do momento de torção máxima, foi determinado o tamanho do acoplamento elástico através do catálogo de acoplamentos da fabricante ECOTORK. Os valores dos coeficientes de aplicação (F1), tempo de funcionamento (F2), frequência de partidas (F3) e temperatura (F4) foram definidos com base nas características do projeto.

A partir da definição dos coeficientes e do cálculo do momento de torção máxima, obteve-se como resultado um momento de torção máximo de 43900 kgf.m para entrada, que cujas valores determinam a escolha do acoplamento modelo TTXLC-TTXLM com as características descritas na Tabela 36.

Tabela 36. Características do acoplamento elástico selecionado (ECOTORK, 2011)

Tamanho do acop.	Torque nominal (N.m)	Torque máximo (N.m)	dmáx (mm)	dmín (mm)	D1 (mm)	D2 (mm)	L1 (mm)	L2 (mm)	L3 (mm)	L4 (mm)	S (mm)	BE (mm)
120	650.000	1.300.000	650	300	1250	900	927	400	280	346	16	127

Na Figura 52 são representadas as dimensões da Tabela 36.

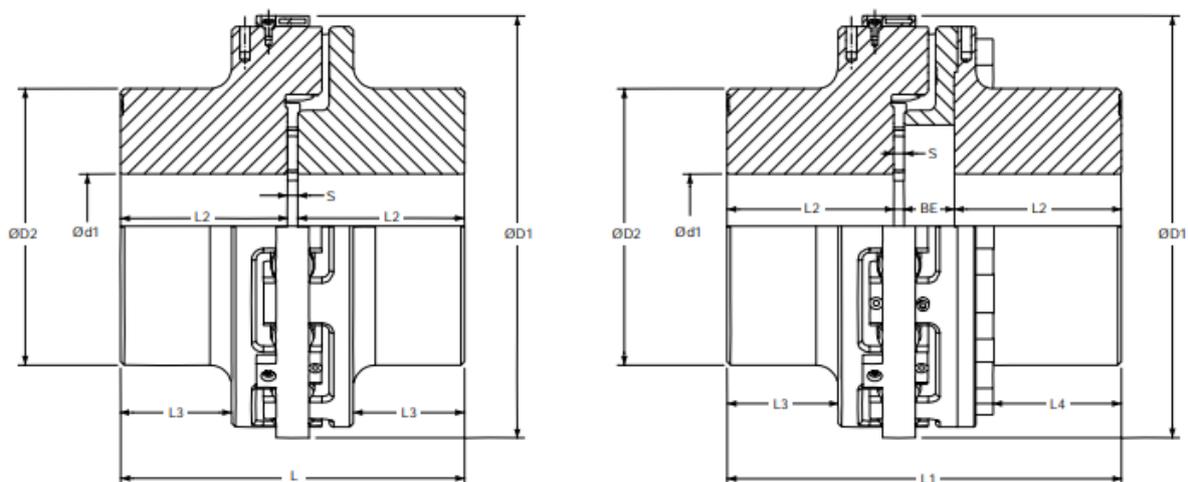


Figura 52. Representação das dimensões do acoplamento elástico selecionado (ECOTORK, 2011).

## 5.9 PROCESSOS DE FABRICAÇÃO

As partes da máquina serão fabricadas de acordo com os processos e materiais descritos na Tabela 37.

Tabela 37. Processos de fabricação e materiais das peças do britador.

Partes da máquina	Processo de fabricação	Material
Eixos e rasgos de anéis	Torneamento	Aço AISI 1050
Estrias	Fresamento	Aço AISI 1050
Martelos e anteparo.	Fundição	Ferro fundido branco de alto-cromo
Carcaça	Soldagem de chapas	Chapas de aço ASTM A36
Rotor	Fundição	Ferro fundido

## 5.10 TOLERÂNCIAS E AJUSTES

Tolerâncias servem para garantir que as peças possam ser fabricadas dentro de um intervalo superior e inferior da medida nominal, isso serve para garantir a qualidade final das mesmas e garantir intercambialidade e padronização entre peças sem perder suas características funcionais. Para isso, convencionou-se o uso de tolerâncias e ajustes para que ocorra uma correta fabricação dentro de uma margem de custo.

Neste trabalho, a especificação das tolerâncias e ajustes será realizada por recorrência as normas internacionais e nacionais, que serão as ISO 286-1, ASME AISI B4.2, NBR 6158, NBR 6409, NBR 14699 e NBR ISO 2768. Essas normas apresentam classes de tolerâncias em função de campos de dimensões nominais, e padronizam a aplicação de tolerâncias dimensionais e geométricas de uma peça a ser fabricada.

## 9.1.2 TOLERÂNCIAS DIMENSIONAIS

Existem 3 conjuntos eixo-furo que serão encaixados por interferência e as principais dimensões possuirão tolerâncias. Neste trabalho a correta especificação das tolerâncias e dos ajustes é imprescindível para que o eixo não desacople do rotor e dos rolamentos.

A NBR 6158 prevê 18 qualidades de trabalho identificadas pelas letras IT seguidas de numerais. Cada uma representa um valor de tolerância, sendo que a qualidade de trabalho diminui conforme o número após o IT aumenta, como apresentado na norma NBR 6158.

		Qualidade de Trabalho																	
		IT01	IT0	IT1	IT2	IT3	IT4	IT5	IT6	IT7	IT8	IT9	IT10	IT11	IT12	IT13	IT14	IT15	IT16
Eixos		mecânica extra-precisa					mecânica corrente						mecânica grosseira						
Furos		mecânica extra-precisa					mecânica corrente						mecânica grosseira						

Figura 53. Qualidade de trabalho para o sistema eixo furo ( NBR 6158).

Na sigla IT, I vem de ISO e T de tolerância e seus numerais representam o grau de qualidade de trabalho, sendo o IT01 a qualidade de trabalho com o grau de tolerância mais precisa e IT16 a qualidade de trabalho o grau de tolerância menos precisa. Neste trabalho iremos usar os ITs que se enquadram em mecânica corrente (IT4 a IT11), sendo recomendados para trabalhos que requerem precisões média-alta, como sistemas de encaixe ou montagens precisas.

Após selecionar a qualidade de trabalho para eixos e furos, o campo de tolerância poderá ser avaliado. Primeiramente, será necessário avaliar o tipo de ajuste necessário de encaixe: ajuste com folga, ajuste com interferência ou ajuste incerto. A escolha desse tipo depende muito da função e atividade da peça, das cargas que ela recebe e do grau de movimento desejado. Existem 28 campos de tolerâncias que basicamente trabalham com o valor da interferência mínimo e máximo entre o eixo e o furo, onde os furos recebem letra maiúscula como indicação de tolerância, e os eixos recebem letra minúscula. Cada letra corresponde a um afastamento característico ao tamanho nominal, de acordo com norma NBR 6158. Existem guias que são apresentados pela norma ANSI B4 para a escolha do correto campo de tolerâncias, sendo adequado na interferência forçada, entre o eixo e o furo do rotor, o H7/u6 que é recomendado para peças que podem sofrer tensões elevadas.

Consultando a consulta a Tabela 38, retirada da NBR 6158 pode-se determinar o valor de  $\Delta D$  para um padrão de qualidade desejado. Como o definido para esse projeto é IT7, então o  $\Delta D$  é sempre relacionado ao diâmetro do eixo.

Tabela 38.  $\Delta D$  de acordo com o diâmetro nominal e qualidade (NBR 6158).

Dimensão nominal (mm)		Graus de tolerância padrão
Acima	Até e inclusive	Tolerância IT7 (mm)
630	800	0,080

O sistema de ajuste escolhido será furo-base, que exige menores custos de ferramental e de fabricação, e há maior facilidade de montagem e desmontagem, além de ser o indicado pelas literaturas e normas para a construção de média e alta precisão. Assim, foi definido o ajuste H7 para os furos e u6 para o eixo. Para os rolamentos, o ajuste escolhido foi o s6, em que a escolha é justificável devido a necessidade de frequentes desmontagens.

Todos os valores de afastamento mínimo e máximo foram obtidos a partir das tabelas presentes na norma NBR 6158, onde se usa o grau de trabalho, o campo de tolerância e a dimensão nominal. A partir desses valores, checa-se um afastamento característico, sendo esses valores de tolerância dimensional utilizadas para a fabricação da máquina que está sendo projetada.

A Tabela 39 foi extraída da norma NBR 6158, citada para classes de tolerâncias relativas a processos de usinagem e campos de dimensões utilizados na fabricação de produtos convencionais.

Tabela 39. Valores de tolerância para o eixo ( $\Delta D = \Delta d$ ) para usinagem (NBR 6158)

Dimensão nominal (mm)		Afastamento inferior
Acima	Até e inclusive	Grau de tolerância “u” (mm)
710	800	+ 0,840

De acordo com o diâmetro e com o afastamento determinado, descobre-se o desvio fundamental, que será usado para calcular as interferências máximas e mínimas na rotina que está no anexo 4.

Os limites de furo e de eixo para um ajuste de esforço médio, utilizando um tamanho básico de 730 mm para o eixo, podem ser calculados. Com os dados das últimas duas tabelas para o furo e para o eixo, respectivamente, temos que para o grau de trabalho IT7,  $\Delta D = \Delta d = 0,080$  mm, assim:

$$D_{\text{máx}} = D + \Delta D = 730 + 0,080 = 730,08 \text{ mm} \quad (94)$$

$$D_{\text{mín}} = D = 730,000 \text{ mm} \quad (95)$$

O eixo é designado como 730u6. A partir da última tabela o desvio fundamental é:

$$\delta_F = + 0,840 \text{ mm} \quad (96)$$

Assim:

$$d_{\text{mín}} = d + \delta_F = 730 + 0,84 = 730,84 \text{ mm} \quad (97)$$

$$d_{\text{máx}} = d + \delta_F + \Delta d = 730 + 0,84 + 0,08 = 730,92 \text{ mm} \quad (98)$$

Dessa forma, pode-se calcular a interferência mínima e máxima, sendo a interferência máxima é a diferença entre as dimensões mínima do furo e máxima do eixo, quando o eixo é maior que o furo e a interferência mínima a diferença entre as dimensões máxima do furo e mínima do eixo, quando o eixo é maior que o furo.

$$I_{\text{máx}} = D_{\text{mín}} - d_{\text{máx}} = 730 - 730,92 = - 0,92 \text{ mm} \quad (99)$$

$$I_{\text{mín}} = D_{\text{máx}} - d_{\text{mín}} = 730,08 - 730,84 = - 0,76 \text{ mm} \quad (100)$$

Onde:

- $I_{m\acute{a}x}$  é a interferência máxima;
- $I_{m\acute{i}n}$  é a interferência mínima;

Através destas equações,  $I_{m\acute{a}x}$  e  $I_{m\acute{i}n}$  serão sempre negativas. A Figura 54 ilustra as interferências máximas e mínimas.

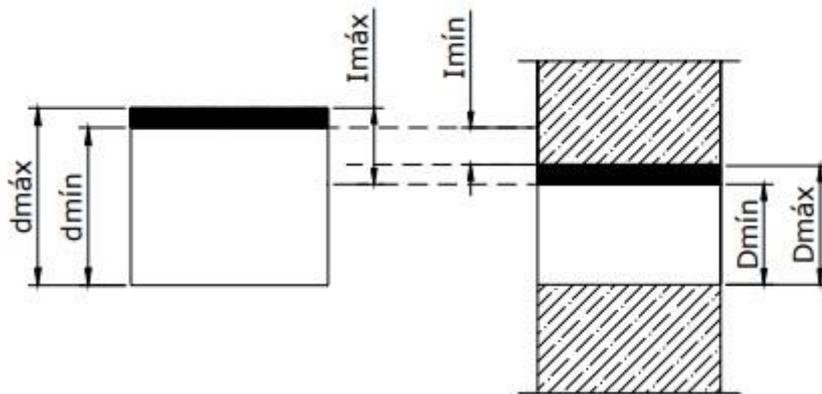


Figura 54. Interferências máxima e mínima (NBR 6158).

Para interferência entre o eixo e os mancais foi adotado o campo H7/s7, que possui ajuste médio devido a necessidade de frequentes desmontagens. O valor de  $\Delta D$  é o mesmo da situação de interferência eixo/rotor por motivo dos furos dos mancais terem dimensão nominal dentro do intervalo 630 a 800 mm. Os cálculos dos diâmetros mínimos e máximos do eixo / mancais e das interferências máximas e mínimas são apresentados a seguir.

Tabela 40. Valores de tolerância para o eixo ( $\Delta D = \Delta d$ ) para usinagem (NBR 6158)

Dimensão nominal (mm)		Afastamento inferior
Acima	Até e inclusive	Grau de tolerância “s” (mm)
710	800	+ 0,380

$$D_{m\acute{a}x} = D + \Delta D = 730 + 0,080 = 730,08 \text{ mm} \quad (101)$$

$$D_{m\acute{i}n} = D = 730,000 \text{ mm} \quad (102)$$

O eixo é designado como 730s6. A partir da última tabela o desvio fundamental é:

$$\delta_F = + 0,380 \text{ mm} \quad (103)$$

Assim:

$$d_{min} = d + \delta_F = 730 + 0,380 = 730,38 \text{ mm} \quad (104)$$

$$d_{max} = d + \delta_F + \Delta d = 730 + 0,380 + 0,080 = 730,46 \text{ mm} \quad (105)$$

As interferências máximas e mínimas são:

$$I_{max} = D_{min} - d_{max} = 730 - 730,46 = - 0,46 \text{ mm} \quad (106)$$

$$I_{min} = D_{max} - d_{min} = 730,08 - 730,38 = - 0,30 \text{ mm} \quad (107)$$

A interferência mínima é a menor interferência que pode haver no ajuste, portanto é a mais crítica.

Tabela 41. Resultados dos ajustes com interferência.

Ajuste com interferência – Rotor/Eixo - rolamento.	Diâmetro nominal	Interferência mínima	Símbolo furo-eixo
Rotor	730 mm	- 0,76 mm	IT7 H7/u6
Eixo	730 mm	- 0,30 mm	IT7 H7/s6

## 5.11 TOLERÂNCIAS GEOMÉTRICAS

Tolerâncias geométricas servem para complementar as tolerâncias dimensionais, quando estas últimas não são suficientes para garantir o bom funcionamento da peça ou máquina a ser produzida. Elas dizem respeito a desvios geométricos que podem ocorrer na hora da fabricação do componente e que vão influenciar no comportamento em funcionamento das superfícies conjugadas de peças acopladas. Tais desvios geométricos podem ser divididos em três categorias: desvios de forma, desvios de orientação e de posição, e desvios de batimento, conforme apresentada nas normas NBR 6409 e NBR 2768-2.

Ao se aplicar uma tolerância geométrica a um elemento, define-se uma chamada “zona de tolerância” dentro da qual esse elemento deve sempre estar inserido. Visando uma diminuição de custos e simplicidade de fabricação, esse tipo de tolerância só deve ser utilizado quando é indispensável ao correto funcionamento e à intercambialidade da peça em questão.

Pela NBR 2768-2, é possível se obter tolerâncias geométricas gerais para um desenho específico. As tolerâncias e símbolos estão mostradas na Figura 55, que não tenha especificação individual de tolerância geométrica. Ou seja, levando em conta sua importância no conjunto e o refinamento inerente ao seu processo de fabricação, seleciona-se uma classe de tolerância que, assim como para o caso de tolerâncias gerais dimensionais, será indicada na legenda do desenho e se aplicará para todas as partes dessa peça.

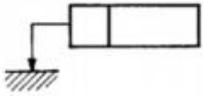
Característica tolerada		Símbolo	Item	
Para elementos isolados 	Forma	Retitude	—	5.9.1
		Planeza		5.9.2
		Circularidade		5.9.3
		Cilindricidade		5.9.4
Para elementos isolados ou associados		Perfil de linha qualquer		5.9.5
		Perfil de superfície qualquer		5.9.6
Para elementos associados	Orientação	Paralelismo		5.9.7
		Perpendicularidade		5.9.8
		Inclinação		5.9.9
	Posição	Posição		5.9.10
		Concentricidade		5.9.11
		Coaxialidade		5.9.12
		Simetria		5.9.13
	Batimento	Circular		5.9.14.1
		Total		5.9.14.2

Figura 55. Tolerâncias Geométricas (NBR 2768-2)

Na tabela abaixo, retirada da norma NBR 2768-2, tem-se tolerâncias de acordo com o diâmetro e classe. É importante salientar que essas tolerâncias gerais se aplicam a todas as características geométricas, com exceção de cilindridade, perfil de linha qualquer, angularidade, coaxialidade, tolerância de posição e batimento total

Tabela 42. Tolerâncias gerais para perpendicularidade (NBR 2768-2).

Classe de tolerância	Tolerância para perpendicularidade para faixa de dimensões nominais (lado menor)			
	Até 100	Acima de 100 até 300	Acima de 300 até 1000	Acima de 1000 até 3000
H	0,2	0,3	0,4	0,5
K	0,4	0,6	0,8	1
L	0,6	1	1,5	2

Para esse projeto, onde se deseja um grau de precisão alto, adotou-se para as peças que desempenham uma função importante no conjunto um intervalo H de tolerância geométrica geral. Além disso, em alguns desenhos técnicos, serão mostradas indicações para tolerâncias mais específicas para partes que demandam uma maior precisão na hora da montagem final do produto, e estas tolerâncias podem ser consultadas nas normas, já que nem todas as tabelas estão apresentadas nesse relatório.

## 5.12 ESTADO DE SUPERFÍCIE

A indicação do estado de superfícies nos desenhos técnicos foi realizada seguindo a norma NBR 8404, em que a classe de rugosidade de cada componente foi determinada segundo a Tabela 43, extraída da norma.

Tabela 43. Classificação das rugosidades  $R_a$  (NBR 8404).

Classe de rugosidade	Desvio médio aritmético ( $R_a$ ) em $\mu\text{m}$
N 12	50
N 11	25
N 10	12,5
N 9	6,3
N 8	3,2
N 7	1,6
N 6	0,8
N 5	0,4
N 4	0,2
N 3	0,1
N 2	0,05
N 1	0,025

E a classificação do grau de rugosidade organizado de acordo com o processo de usinagem pode ser obtido pela Figura 56.

PROCESSO	VALORES DE RUGOSIDADE ( $\square m R_a$ )												
	50	25	12,5	6,3	3,2	1,6	0,8	0,4	0,2	0,1	0,05	0,025	0,0125
OXICORTE													
SNAGGING													
SERRA													
PLAINAMENTO, SHAPING													
FURAÇÃO													
USINAGEM QUÍMICA													
ELETROEROSÃO													
FRESAMENTO													
BROCHAMENTO													
REAMING													
FEIXE DE ELETRONS													
LASER													
ELETROQUÍMICA													
TORNEAMENTO,													
BARREL FINISHING													
RETIFICAÇÃO ELETROLÍTICA													
ROLETAMENTO													
RETIFICAÇÃO													
BRILHAMENTO													
POLIMENTO ELETROLÍTICO													
POLIMENTO													
LAPIDAÇÃO													
SUPPERFINISHING													
FUNDIÇÃO EM AREIA													
LAMINAÇÃO A QUENTE													
FORJAMENTO													
FUNDIÇÃO EM MOLDE PERMANENTE													
INVESTMENT CASTING													
ESTRUSÃO													
LAMINAÇÃO A FRIO													
FUNDIÇÃO SOB PRESSÃO													
	50	25	12,5	6,3	3,2	1,6	0,8	0,4	0,2	0,1	0,05	0,025	0,0125

Figura 56. Classificação das rugosidades de acordo com o processo de fabricação (NBR 8404).

A partir da Figura 56 foram determinadas as rugosidades superficiais adotando o valor médio recomendado, a fim de evitar trincas superficiais. Dessa forma, as rugosidades médias devem estar abaixo dos valores determinados na tabela abaixo.

Tabela 44. Valores de rugosidades médias (NBR 8404).

Partes da máquina	Processo de fabricação	Valor de Ra
Eixos e rasgos de anéis	Torneamento	0,4 $\mu m$
Estrias	Fresamento	1,6 $\mu m$
Martelos, anteparo, carcaça e rotor	Fundição	0,8 $\mu m$

## 5.13 TOLERÂNCIA PARA AS ESTRIAS

A norma DIN 5480 (Deutsches Institut Für Normung, 1991) contém as faixas de tolerâncias para os diversos ajustes de estrias possíveis. Seleciona-se o ajuste transicional fino, de maneira a garantir a ausência de folgas e a coaxialidade do sistema com uma pequena interferência, mas ainda com a possibilidade de desmonte das junções para manutenção. As classes de tolerância de acordo com a nomenclatura da ISO são H8 no cubo e p8 no eixo.

A Tabela 45 é uma reprodução da tabela de onde tais faixas de tolerância foram retiradas, para simples conferência.

Tabela 45. Tabela de faixas de tolerância para estrias (Norma DIN 5480)

Tipo de medida	Desvios/tolerâncias						
	Furo			Eixo			
Ajuste áspero com interferência			9H	9v			
Ajuste fino com interferência	7H	8H		7p	8s		
Ajuste fino áspero de transição			9H	9p			
Ajuste fino de transição	7H	8H		7m	8n		
Ajuste livre áspero			9H	9g	9e	9d	10c
Ajuste livre fino	7H	8H		7h	7g	8f	

## 5.14 RESULTADO DAS TOLERÂNCIAS

A Tabela 46 fornece as tolerâncias selecionadas com o padrão de qualidade escolhido. O tipo de ajuste é com interferência, e as interferências mínimas, mais críticas, estão calculadas.

Tabela 46. Resultados das tolerâncias.

Ajuste com interferência – Rotor/Eixo - rolamento.	Diâmetro nominal	Interferência mínima	Símbolo furo-eixo
Rotor	730 mm	- 0,76 mm	IT7 H7/u6
Eixo	730 mm	- 0,30 mm	IT7 H7/s6
Estrias	200 mm	-0,023 mm	IT8 H8/n8

## 6 ANÁLISE DE CUSTOS E VIABILIDADE

*Este capítulo trata de estimar os custos totais para fabricar o britador e realiza uma análise de payback com o intuito de estimar o tempo para que a própria máquina retorne o valor investido para a sua fabricação.*

### 6.1 LISTA DE COMPONENTES

Listamos aqui, todos os componentes necessários ao desenvolvimento do projeto do britador, cada um com suas devidas especificações de material, modelo e quantidade.

Tabela 47. Lista de componentes, especificações, material e quantidade.

Nome	Designação	Material	Quantidade
Eixo	D = 730 mm	AISI 1045	1
Rolamentos	SKF 21319-EK	-	2
Anteparos	l = 1500, b = 1000, d = 100	Aço ao cromo	3
Martelos	l = 1500, b = 400, d = 150	Aço ao cromo	4
Parafusos/arruelas/porcas	M 20x1,5	Liga Q&T	56
Anéis de retenção	J750	-	4
Correia	Micro V PL2019	-	1
Polia menor	D = 250 mm	AISI 1045	1
Polia maior	D = 375 mm	AISI 1045	1
Motor	HGF WEG	-	1
Redutor	300M Bonfiglioli	-	1
Carcaça	-	ASTM A36	1
Rotor	-	Ferro fundido	4

### 6.2 ESTIMATIVA DE MATERIAL, CUSTO DE FABRICAÇÃO E COMPRA DOS COMPONENTES

A estimativa de custo de fabricação e compra dos materiais do britador foi feita com base no custo médio encontrado em orçamentos realizados em fornecedores de material e empresas que realizam os respectivos processos de fabricação mecânica, e também através de tabelas disponibilizadas pela Sociedade dos Engenheiros Automotivos (SAE).

No que diz respeito ao custo dos materiais utilizados para a fabricação do eixo, anteparo, polias, martelos, rotor e carcaça metálica, consideramos a massa exata da maioria dos

componentes para o orçamento da quantidade de material necessária, porém devido ao fato de que existem processos de fabricação inerentes ao projeto, tem-se que comprar mais material do que se usa, tendo em vista a perda de material que ocorre em cada processo de fabricação. Esse fato aliado à possível compra de materiais no exterior, o que faria aparecer taxas de importação, e ao fato de que a compra dos materiais no preço estipulado, geralmente, ocorre para a compra de várias toneladas incrementa o custo final do britador. Sendo assim, buscamos considerar esses efeitos e, ao preço final da compra de materiais, acrescentamos um total de 10%.

Para os demais componentes, que não são fabricados, por já serem comprados prontos para a utilização, os preços foram estimados com base em orçamentos realizados em fornecedores de cada componente, como parafusos, rolamentos, correia, anéis de retenção, motor e redutor. E, da mesma forma que para o material, acrescentamos um valor de 10% ao custo final de componentes, relacionado ao transporte e eventuais outros gastos.

Por fim, os preços dos tratamentos térmicos foram estimados com base nos valores médios cobrados por empresas do setor. Todas as estimativas com base em massa e volume foram calculadas a partir dos modelos sólidos correspondentes aos diversos componentes.

Tendo como referência o que foi dito neste tópico e em tópicos anteriores sobre fabricação, disponibiliza-se os valores encontrados para compra de componentes, processos de fabricação e tratamentos térmicos nas tabelas que seguem.

Tabela 48. Estimativas de preço de aquisição do material e demais componentes.

Nome	Preço Unitário	Material	Quantidade-Massa	Subtotal
Eixo	2 R\$/kg	AISI 1045	5022 kg	R\$ 10044,00
Rolamentos	R\$ 5200,00	-	2	R\$ 10400,00
Anteparos	3 R\$/kg	Aço ao cromo	3600 kg	R\$ 10800,00
Martelos	3 R\$/kg	Aço ao cromo	2880 kg	R\$ 8640,00
Parafusos/arruelas/porcas	R\$ 3,94	Liga Q&T	56	R\$ 220,64
Anéis de retenção	R\$ 7,50	-	4	R\$ 30,00
Correia	R\$ 4250,00	-	1	R\$ 4250,00
Polia motora	2 R\$/kg	AISI 1045	1	R\$ 1800,00
Polia movida	2 R\$/kg	AISI 1045	1	R\$ 8600,00
Motor	R\$ 18500,00	-	1	R\$ 18500,00
Redutor	R\$ 2592,00	-	1	R\$ 2592,00
Carcaça	2 R\$/kg	ASTM A36	500 kg	R\$ 1000,00
Rotor	2 R\$/kg	Ferro fundido	21205 kg	R\$ 42411,00
Total	-	-	-	R\$ 117145,64

No caso, específico dos martelos, carcaça, eixo, anteparos, rotor não foi considerado a massa exata do componente e sim a massa do tarugo de material com as mesmas dimensões. Sendo assim, obtivemos um preço para a compra de materiais e componentes de R\$ 117145,64, que ao ser acrescido 10%, fica R\$ 128860,20.

Tabela 49. Custos referentes aos processos de fabricação escolhidos

Nome	Preço Unitário	Material	Processo de fabricação	Subtotal
Eixo	0,49 R\$/cm <sup>3</sup>	AISI 1045	Torneamento Fresamento	R\$ 6152,52
Anteparos	4,80 R\$/kg	Aço ao cromo	Fundição	R\$ 17280,00
Martelos	4,80 R\$/kg	Aço ao cromo	Fundição	R\$ 13824,00
Carcaça	4,80 R\$/kg	ASTM A36	Fundição	R\$ 2400,00
Rotor	4,80 R\$/kg	Ferro fundido	Fundição	R\$ 101784,00
Total	-	-	-	R\$ 141440,52

Para a parte de custos de fabricação, os preços unitários estão expressos por unidade de volume e de massa, e para obtê-los foi multiplicado pelos volumes e massa exatos dos materiais, obtidos através de modelos sólidos dos componentes. Sendo assim, pelo fato já apresentado anteriormente de que deveria existir uma quantidade extra de material, foi multiplicado o valor final encontrado por 1,1, de modo a se obter 10% a mais de custos. Dessa forma, obteve-se um custo total de R\$ 155584,57.

Tabela 50. Custo estimado dos tratamentos térmicos.

Nome	Preço Unitário	Material	Demais procedimentos	Subtotal
Eixo	7,50 R\$/kg	AISI 1045	Normalização	R\$ 37665,00
Martelos	17,77 R\$/kg	Aço ao cromo	Têmpera e Revenimento	R\$ 51177,60
Total	-	-	-	R\$ 88842,60

Obteve-se, então, um custo total referente a processos de tratamentos térmicos igual a R\$ 88842,60.

Considerando que esse projeto leve um ano para ser realizado por 2 engenheiros mecânicos, com salário mensal de R\$ 10.000,00, isso levantaria um custo de homem-hora de R\$ 240.000,00 e considerando o custo de R\$ 40.000,00 para os gastos com software, em geral. Isso acrescentaria na realização do projeto, R\$ 280.000,00.

Sendo assim, ao se obter todos os custos referentes ao projeto do britador de impacto, os valores foram disponibilizados em tabela e somados, obtendo o custo final do projeto.

Tabela 51. Custo final do projeto.

Processo	Custo
Materiais e componentes	R\$ 128860,20
Processo de fabricação	R\$ 155584,57
Tratamentos térmicos	R\$ 88842,60
Homens-hora/Softwares	R\$ 280000,00
Total	R\$ 653287,37

### 6.3 ANÁLISE DE PAYBACK

Considerando uma produtividade de 200 t/h, que a máquina trabalha 8 horas por dia, durante 20 dias do mês e que o calcário é vendido por R\$ 32,00/t. Em um mês, o dono terá uma receita de R\$ 1024000,00. Estimando o custo mensal para manter apenas essa máquina em operação plena, considerando energia elétrica, máquinas para retirar o calcário, funcionários e outros gastos em R\$ 3000,00 por mês, e um lucro apenas do britador por mês de R\$ 55000,00 e uma taxa de juros de 10% a.m. A análise de payback é realizada e mostrada na e Tabela 52 na Figura 57.

Tabela 52. Fluxo de caixa do britador.

n	Caixa (\$)		i = 10% a.m		
	Saídas	Entradas	Fluxo de caixa (FC)	VP dos termos do FC	VPL acumulado
0	-653287		-653287	-653287	-653287
1	-3000	55000	52000	-606015	-1259302
2	-3000	55000	52000	-558742	-1818044
3	-3000	55000	52000	-511469	-2329513
4	-3000	55000	52000	-464196	-2793710
5	-3000	55000	52000	-416924	-3210633
6	-3000	55000	52000	-369651	-3580284
7	-3000	55000	52000	-322378	-3902663
8	-3000	55000	52000	-275106	-4177768
9	-3000	55000	52000	-227833	-4405601
10	-3000	55000	52000	-180560	-4586161
11	-3000	55000	52000	-133287	-4719448
12	-3000	55000	52000	-86015	-4805463
13	-3000	55000	52000	-38742	-4844205
14	-3000	55000	52000	8531	-4835674
15	-3000	55000	52000	55804	-4779871
16	-3000	55000	52000	103076	-4676794
17	-3000	55000	52000	150349	-4526445
18	-3000	55000	52000	197622	-4328824
19	-3000	55000	52000	244894	-4083929
20	-3000	55000	52000	292167	-3791762
21	-3000	55000	52000	339440	-3452322
22	-3000	55000	52000	386713	-3065610
23	-3000	55000	52000	433985	-2631624
24	-3000	55000	52000	481258	-2150366
25	-3000	55000	52000	528531	-1621835
26	-3000	55000	52000	575804	-1046032
27	-3000	55000	52000	623076	-422955
28	-3000	55000	52000	670349	247394
29	-3000	55000	52000	717622	965015
30	-3000	55000	52000	764894	1729910
31	-3000	55000	52000	812167	2542077
	-30000	550000	520000	5994399	VPL do Projeto

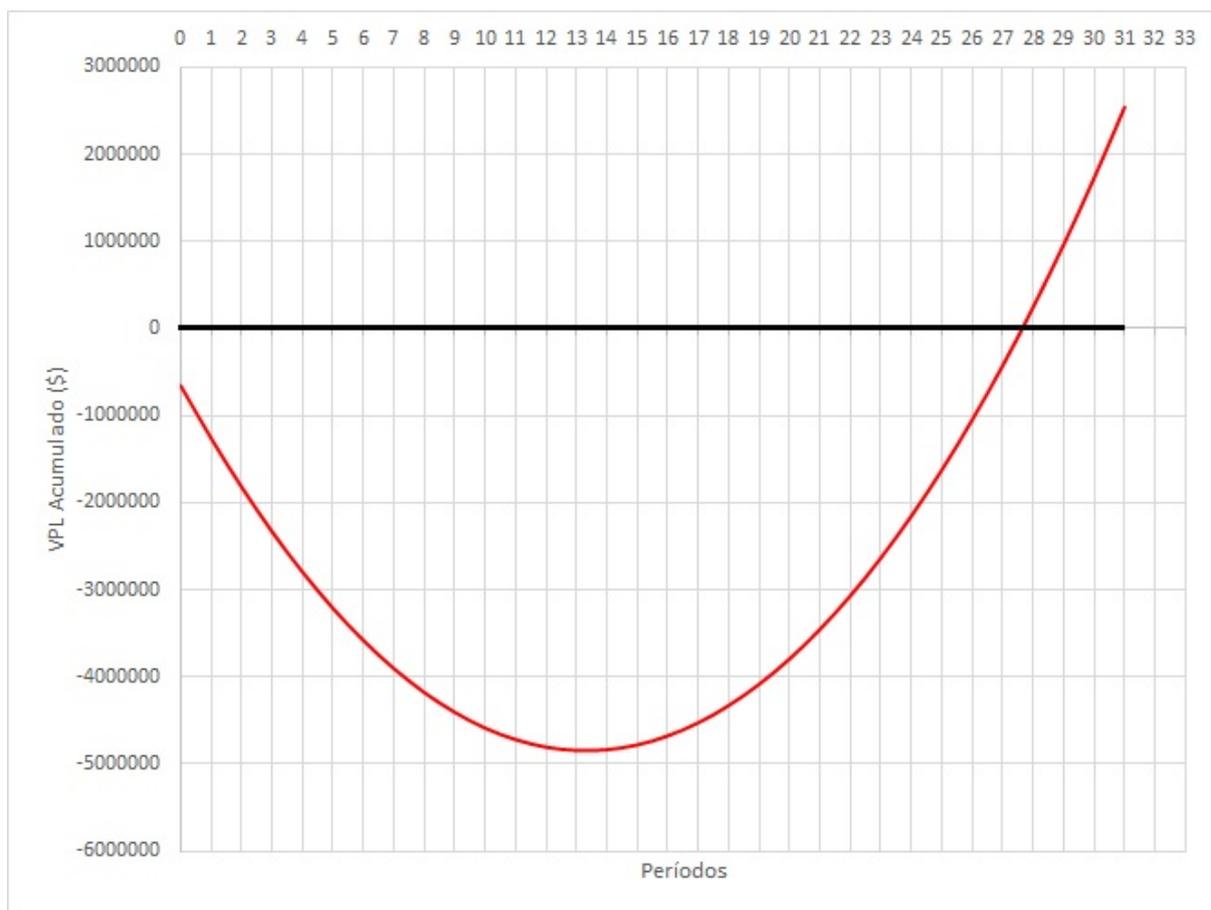


Figura 57. Evolução do valor presente líquido acumulado.

É possível concluir então que o valor presente líquido deixa de ser negativo entre o 27º e o 28º mês de funcionamento, portanto, isso indica que o payback é de 28 meses, ou seja, a partir do 28º mês de funcionamento pleno, a máquina retornaria os R\$ 653287,37 investidos inicialmente e passaria a gerar um lucro mensal de R\$ 52.000,00.

De acordo com a Tabela 53, é possível comparar os lucros em diferentes aplicações com um capital inicial de R\$ 653287,37 e comparar também com o investimento no projeto do britador. A aplicação com maior taxa de juros gera um lucro anual de R\$ 57.620,00, enquanto que o investimento no britador levaria 28 meses para retornar o valor investido inicialmente e a partir daí teria um lucro mensal de R\$ 52.000,00, portanto, um lucro anual de R\$ 624.000,00, que é muito mais vantajoso que qualquer uma das aplicações descritas na Tabela 53, viabilizando, economicamente, o projeto.

Tabela 53. Lucro anual em diferentes aplicações.

Valor	Investimento	Tempo (anos)	Taxa de juros (a.a.)	Lucro
653.287,37	Títulos públicos (SELIC)	1	6,50%	R\$ 42.464,00
653.287,37	Poupança	1	6,77 %	R\$ 44.228,00
653.287,37	CDB e LC	1	7,61 %	R\$ 49.715,00
653.287,37	Letras financeiras	1	8,82 %	R\$ 57.620,00

## 7 CONCLUSÕES

*Este último capítulo visa retomar as conclusões, de forma objetiva, do dimensionamento e seleção dos componentes do britador.*

Um britador foi dimensionado a partir de uma análise energética que considera uma redução de 50 vezes, as rochas entram com 500 mm e no primeiro choque se reduzem a pedaços de 10 mm, essa condição inicial adotada é utilizada para calcular a força necessária para essa redução e todo o projeto é baseado nela.

O componente mais crítico do britador é o martelo, e o mesmo não falha por exceder o limite de escoamento do material, falha por impacto e abrasão, por isso é superdimensionado. O coeficiente de segurança do martelo feito de aço ao cromo foi de 25 (Método de elementos finitos). Então uma das soluções possíveis para resolver o problema do desgaste excessivo, é refazer o martelo com uma liga especial de fabricação rica em Manganês (FC AMn -01) com 12,5% de Manganês e 1,6% de Cromo. Essa liga possui a característica de resistir ao desgaste e apresentar excelente durabilidade quando submetida a impacto e abrasão. Portanto teve características que fizeram dela a melhor escolha para os martelos de alto rendimento, devido à necessidade de uma durabilidade elevada, sem risco de quebras.

Uma outra solução para o problema do desgaste excessivo do martelo é aumentar a quantidade de material na região superior do martelo e fazer um tratamento térmico de têmpera seguido de revenido com o objetivo de produzir a microestrutura de martensita revenida, que proporciona a melhor combinação de resistência mecânica/dureza e tenacidade à fratura.

O anteparo e o rotor também não falham por exceder limite de escoamento, mas o rotor ser robusto é interessante pois funciona como um volante de inércia, possibilitando o acúmulo de energia, na forma cinética, que garante o contínuo funcionamento e previne contra eventuais situações mais críticas, como entrada de uma rocha com dureza maior ou diâmetro maior que 500 mm.

O rotor ser robusto gera uma força peso muito grande, fazendo com que o eixo fique grande (730 mm). Fazer uma redução de 50 vezes em uma rocha esférica de calcário, rotor com diâmetro externo de 1,5 m, utilizar a teoria de fadiga (mais crítica) para dimensionamento do eixo com coeficiente de segurança 2, foram medidas tomadas que justificam o eixo sair com diâmetro de 730 mm.

A partir das cargas sobre o eixo, foi possível calcular as reações nos dois apoios, possibilitando a seleção dos rolamentos, que são idênticos, pois as reações nos mancais são as mesmas, devido à simetria da distribuição das cargas. Anéis de retenção foram selecionados para garantir que os rolamentos não se movimentem axialmente.

O motor, polias e correia foram selecionados de acordo com a rotação e o torque necessários para reduzir em 50 vezes uma rocha calcária em apenas um choque, condição muito conservadora. O torque foi calculado a partir da análise energética e a distância do centro do eixo ao ponto de aplicação da carga na rocha esférica.

Um melhoramento desse projeto com relação aos outros britadores de impacto é que a união do rotor com os martelos, por parafusos de fixação, possibilita a troca dos martelos sem ter que retirar o rotor, bastando retirar os 14 parafusos de cada união.

O britador projetado tem um custo total de R\$ 653287,37, para uma produção estimada de 200 t/h, que proporcionará um payback de 28 meses.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALVES, A. DE C.; ARAGÃO, E.; TORQUATO, L. P.; BRAGHINI JUNIOR, A. **O modelo de criatividade trevo fractal como gerador de idéias, conceitos e solução técnica para a melhoria de um processo produtivo.** XVIII Encontro Nacional de Engenharia de Produção A integração de cadeias produtivas com a abordagem da manufatura sustentável. Rio de Janeiro, RJ, Brasil, 13 a 16 de outubro de 2008.

ALVES, A. de C. **O trevo fractal como modelo de referência de produtos em pequenas empresas.** 2009. 159f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Produção) Programa de Engenharia de Produção – Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Campus Ponta Grossa, Ponta Grossa-Paraná, 2009.

DALLAROSA, Aurélio Zoelner. **Proposta de melhoria no processo industrial do carbonato de cálcio apoiada em modelo de referência do desenvolvimento de produto e processo.** 2011. 170 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia de Produção, Diretoria de Pesquisa e Pós-graduação, Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Ponta Grossa, 2011.

SOBRAL, Francisca. **Procedimento alternativo de preparação de carbonato de cálcio precipitado de elevada pureza.** Universidade Federal do Ceará-Departamento de química orgânica e inorgânica, Fortaleza,Ce, v. 1, n. 1, p. 1-15, jan. 1995. Disponível em: <[http://www.repositorio.ufc.br/bitstream/riufc/1139/1/1995\\_dis\\_Fr Sobral.pdf](http://www.repositorio.ufc.br/bitstream/riufc/1139/1/1995_dis_Fr_Sobral.pdf)>. Acesso em: 23 ago. 2017.

GRUPO VOTORANTIM CIMENTOS. **Processos de produção da cal.** Disponível em:[http://www.vcimentos.com.br/htms-ptb/Produtos/Cal\\_procFabricacao.html](http://www.vcimentos.com.br/htms-ptb/Produtos/Cal_procFabricacao.html). Acesso em: set. 2017.

SAMPAIO, J. A., ALMEIDA, S. L. M., 2009. **Calcário e dolomito – Capítulo 16, in rochas & minerais industriais: usos e especificações,** Ed. Adão Benvindo da Luz e Fernando A. Freitas Lins. Disponível em <http://www.cetem.gov.br/agrominerais/livros/16-agrominerais-calcariodolomito.pdf>. Acesso em set. 2017.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE PRODUÇÃO MINERAL (DNPM). **Sumário Mineral 2015,** ISSN 0101-2053, ano base 2014.

SILVA, José Otávio da. **Perfil da cal: Projeto de assistência técnica ao setor de energia.** São Paulo: J. Mendo, 2009. Disponível em: <[http://www.mme.gov.br/documents/1138775/1256652/P46\\_RT72\\_Perfil\\_do\\_Cal.pdf/414a14fd-4574-4b22-bc3b-d07a3955bc69](http://www.mme.gov.br/documents/1138775/1256652/P46_RT72_Perfil_do_Cal.pdf/414a14fd-4574-4b22-bc3b-d07a3955bc69)>. Acesso em: 19 set. 2017.

FIGUEIRA, H. V. O.; ALMEIDA, S. L. M.; LUZ, A. B. **Cominuição.** In: LUZ, A. B.;

SAMPAIO, J. A.; ALMEIDA, S. L. M. **Tratamento de minérios**. 4a Edição. Rio de Janeiro: CETEM-CNPq-MCT, 2004. Capítulo 4, páginas 113-194.

GALERY, R. **Fragmentação de Minérios: Primeira Parte**. Belo Horizonte: UFMG, 2011. 23 p.

METSO. **Catálogo Nordberg Britadores de Mandíbulas Série C**. Finlândia, 2011. 24p.

METSO. **Manual de Britagem Metso**. 6a Edição. 2005. 501p.

ROWLAND, C. A.; KJOS, D. M. **Mineral Processing Plant Design**, Ed A. Mular and R. Bhappu. New York, 1978.

THYSSENKRUPP. **Catálogo ThyssenKrupp Hammer and Mammut Crusher**. Stirling, 2003. 2p.

VALADÃO, G. E. S.; ARAUJO, A. C. **Introdução ao Tratamento de Minérios**. 1a Edição. Belo Horizonte: Editora UFMG, 2007. 234p.

CARVALHO, Marina De. **Equipamentos de Fragmentação: Uma Revisão Avaliando Circuitos Alternativos para a Moagem de Finos**. Escola de Engenharia da Universidade Federal de Minas, Belo Horizonte, v. 1, n. 1, p. 15-51, jul. 2012. Disponível em: <[http://www.bibliotecadigital.ufmg.br/dspace/bitstream/handle/1843/BUOS9CAJ7H/monografia\\_\\_\\_mariana\\_xavier\\_sans\\_de\\_carvalho\\_rev\\_34x.pdf?sequence=1](http://www.bibliotecadigital.ufmg.br/dspace/bitstream/handle/1843/BUOS9CAJ7H/monografia___mariana_xavier_sans_de_carvalho_rev_34x.pdf?sequence=1)>. Acesso em: 10 out. 2017.

VARELA, J. **Critérios de seleção de britadores aplicados ao processamento mineral**. In: XXIV ENTMME, Salvador, 2011. p.384-391.

METSO MINERALS. **Britadores de Impacto Nordber Série NP: catálogo**. 2005. Espanha. 11 p.

SANTANA, Dulcinéia de castro; CHARBEL, Paulo André. **Mineração: Notas de aula do curso técnico de mineração**. Fevereiro de 2009. 68 slides. Notas de Aula. Apresentação MS PowerPoint.

FREITAS, Angélica Duarte. **Caracterização Mineralógica de Calcário**. Rio de Janeiro: Cnpq, 2008. 6 p.

SHIGLEY, J. E.; BUDYNAS, R. G.; NISBETT, J. K. **Elementos de máquinas de Shigley**. 8 ed. Porto Alegre: AMGH, 2011. 1084 p.

HENRIQUES, ANTONIO MANOEL DIAS. **Transmissão por correias: Tipos e seleções**. 06 mar. 2017, 07 jul. 2017. 258 p. Notas de Aula.

SHIGLEY, J. E.; BUDYNAS, R. G.; NISBETT, J. K. **Elementos de máquinas de Shigley**. 10 ed. Porto Alegre: AMGH, 2016. 1084 p.

INDUCAL. **Inducal**. Disponível em: <<http://www.inducal.com.br/>>. Acesso em: 02 nov. 2017.

MOINHO PARA CALCÁRIO. **Melhor moinho para calcário**. Disponível em: <<http://moinhoparacalcario.blogspot.com.br/2012/05/qual-melhor-moinho-para-calcario-cal.html>>. Acesso em: 31 ago. 2017.

WIKIPÉDIA. **Calcinação**. Disponível em: <<https://pt.wikipedia.org/wiki/calcinção>>. Acesso em: 08 set. 2017.

REVISTA IH. **Forno rotativo**. Disponível em: <<http://revistaih.com.br/remodelando-revestimentos-refratarios-convencionais/>>. Acesso em: 15 nov. 2017.

MECÂNICA INDUSTRIAL. **Forno rotativo**. Disponível em: <<https://www.mecanicaindustrial.com.br/184-o-que-e-um-forno-rotativo/>>. Acesso em: 15 nov. 2017.

INOVATRONIC. **Hidratação da cal**. Disponível em: <<http://www.inovatronic.com.br/html/hidratacao%20da%20cal.htm>>. Acesso em: 23 nov. 2017.

HENRIQUES, ANTONIO MANOEL DIAS. **Transmissão por correias: Tipos e seleções**. 06 mar. 2017, 07 jul. 2017. 258 p. Notas de Aula.

M. Kallel, Zouch F., Antar Z., Bahri A., Elleuch K., **Hammer premature wear in mineral crushing process**, Tribology International 115 (2017) 493–505.

BUDYNAS, R. G.; NISBETT, J. K. **Elementos de Máquinas de Shigley**. 10a ed. Porto Alegre, Brasil: AMGH, 2016. ISBN 978-85-8055-554-7.

ACOMPLAMENTOS ECOTEK. **Catálogo de acoplamentos**. Disponível em: <<http://korbras.com.br/acoplamentos.pdf>>. Acesso em: 31 mai. 2018.

ANELBRAS - SEEGER-ORBIS - ANEL DE RETENÇÃO SEEGER - ANEL ELÁSTICO - ANEL DE TRAVAMENTO - DIN471 - DIN472 - DIN6799 - DIN 983 - DIN 984 - DIN 5417 - DIN 988 - ANEL DE RETENCAO - ANEL ELASTICO - ARRUELAS COMPENSADORAS. **Anelbras catálogo**. Disponível em: <<http://anelbras.com.br/documents/cesnet.pdf>>. Acesso em: 05 jun. 2018.

BONFIGLIOLI LINHA INDUSTRIAL. **Redutores planetários**. Disponível em:

<<https://www.bonfigliolidobrasil.com.br/pt-br/industrial/produtos/motorreduutores-e-reduutores/motorreduutores-planetarios/product/300-reduutores-planetarios-industrial/>>. Acesso em: 31 mai. 2018.

CORREIAS SCHNEIDER. **Polias para correias micro “v” pl.** Disponível em: <<http://www.correias-schneider.com.br/polias/pdf/polias-micro-v-pl.pdf>>. Acesso em: 26 mai. 2018.

EDISCIPLINAS.USP. **Norma nbr 6158-sistema de tolerâncias e ajustes.** Disponível em: <[https://edisciplinas.usp.br/pluginfile.php/3838104/mod\\_resource/content/1/nbr%206158.pdf](https://edisciplinas.usp.br/pluginfile.php/3838104/mod_resource/content/1/nbr%206158.pdf)>. Acesso em: 08 jun. 2018.

EURO FLEX. **Catálogo correias industriais 2015 micro v.** Disponível em: <[http://www.euroflex.ind.br/images\\_up/catalogo\\_correias\\_industriais.pdf](http://www.euroflex.ind.br/images_up/catalogo_correias_industriais.pdf)>. Acesso em: 04 jun. 2018.

WEG. **Hgf motor trifásico de indução.** Disponível em: <<http://ecatalog.weg.net/files/wegnet/weg-hgf-motor-trifasico-de-inducao-50029374-catalogo-portugues-br.pdf>>. Acesso em: 25 mai. 2018.

DEPARTAMENTO ACADÊMICO DE ELETROTÉCNICA-UTFPR. **Nbr 8404-indicação do estado de superfície em desenho.** Disponível em: <<http://www.daelt.ct.utfpr.edu.br/professores/cassilha/nbr%208404%20%20-%20indicacao%20do%20estado%20de%20superficies%20em%20desenhos%20tecnicos.pdf>>. Acesso em: 07 jun. 2018.

DEPARTAMENTO ACADÊMICO DE ELETROTÉCNICA-UTFPR. **Nbr iso 2768-2-tolerâncias gerais parte 2.** Disponível em: <[http://www.daelt.ct.utfpr.edu.br/professores/cassilha/nbr\\_iso\\_2768-2\\_tolerancias\\_gerais.pdf](http://www.daelt.ct.utfpr.edu.br/professores/cassilha/nbr_iso_2768-2_tolerancias_gerais.pdf)>. Acesso em: 06 jun. 2018.

ENGINEERING. **Din 5480-1 splined connections with involute.** Disponível em: <[http://files.engineering.com/download.aspx?folder=23def1a5-6fb7-4c16-8e6e-bf64c5d2862a&file=spline\\_din\\_5480.pdf](http://files.engineering.com/download.aspx?folder=23def1a5-6fb7-4c16-8e6e-bf64c5d2862a&file=spline_din_5480.pdf)>. Acesso em: 08 jun. 2018.

# APÊNDICES

- A.1. Programa MATLAB utilizado para dimensionar o eixo.
- A.2. Programa MATLAB utilizado para a seleção do acoplamento elástico.
- A.3. Desenhos Técnicos.

## A.1 – Apêndice 1

```
clc
close all
clear all

% eixo
%%%%% ESTÁTICO %%%%%

E = 205000000000 ; % modulo de elasticidade

nd_e = 2 ; %fator de segurança pra estático

Sy = 427000000 ; %limite ao escoamento do material

Sut = 748000000 ; %limite de resistência a tração

M = input('informe o valor do fletor '); % momento fletor no ponto de
análise

T = input('informe o valor do torçor '); % toque no ponto de análise

d_estatico = (16*nd_e/(pi*Sy)*(4*M^2 + 3*T*T)^0.5)^(1/3);

%%%%% PROJETO PRA FADIGA UTILIZANDO GOODMAN %%%%%

Ma = M ;

Mm = 0 ;

Ta = 0 ;

Tm = T ;

Kf = input('informe o valor do Kf ');

Kfs = input('informe o valor do Kfs ');

q = 0.6 ;

q_cisalhamento = 0.77 ;

Se = 0.504*Sut;
```

```

ka = 4.51*(Sut)^(-0.251); % considerando acabamento usinado

kb = 1.51*(d_estatico)^-0.107; % considerando inicialmente o diâmetro do
projeto estático

kc = 1; % assumindo carregamento de torção combinado com flexão

kd = 1; % assumindo temperatura ambiente

ke = 0.753;

kf = 1;

Se_real = ka*kb*kc*kd*ke*kf*Se;

nd_f = 2;

d_fadiga = ((16*nd_f/pi)*(((4*((Kf*Ma)/Se_real)^2)) +
(3*((Kfs*Tm)/Sy)^2)))^(1/2)))^(1/3);

% correção de resultados de fadiga

kb_novo = 1.51*(d_fadiga)^-0.107;

Se_realnovo = ka*kb_novo*kc*kd*ke*kf*Se;

d_fadiganovo = ((16*nd_f/pi)*(((4*((Kf*Ma)/Se_realnovo)^2)) +
(3*((Kfs*Tm)/Sy)^2)))^(1/2)))^(1/3);

%%%%%%%% DEFLEXAO LINEAR %%%%%%%%%

nd_d= 2;
teta_max_adm = 0.0005 ;% angulo maximo de deflexao toleravel

F_1 = 3060;%força [N] peso do eixo

P_1 = 232380;% força [N] concentrada no centro do vão (devido ao
carregamento distribuído)

a = 0.9; %distância em relação ao mancal esquerdo da força distribuída
a_2 = 0.9; %distância em relação ao mancal direito da força F2 (peso)
l = 1.8 ; %comprimento entre mancais
l_2 = 1.8; %comprimento entre mancais

d_deflexao_e_1 = ((32*nd_d / (3*pi*E*l*teta_max_adm))* ((F_1 * a *
l^2)+(P_1*a_2*l_2^2)))^(0.25)
d_deflexao_d_1 = ((32*nd_d/ (3*pi*E*l*teta_max_adm))*(((F_1 *(l^3 +l^2 -
4*a*1)))+(P_1*(l^3 +l^2 -4*a_2*1 )))))^(0.25);

%%%%%%%% DEFLEXAO ANGULAR %%%%%%%%%

G = 75800000000; % modulo de cisalhamento

```

```

teta_angular = 1.2; %variação em graus por metro linear;

d_deflexao_angular = (nd_d*T*400*583.6/(G*teta_angular))^(0.25);

%%%%%%%% VELOCIDADE CRITICA %%%%%%%%%

g = 9.820; % gravidade local

gama = (23688*9.82)/0.039; % peso especifico

I_1 = (pi*0.780^4)/64;

at_1 = (pi*0.780^2)/4;

F_crit_1 = 235440;

a_crit_1 = 0.9;

l_total_1 = 1.8;

y_max_1 = (F_crit_1*a_crit_1^2*(1+a_crit_1))/(3*E*I_1);

omega_n1 = sqrt(g/y_max_1);

omega_pesol = ((pi/l_total_1)^2)*(g*E*I_1/(at_1*gama))^0.5

omega_1 = (((1/omega_pesol)^2 + (1/omega_n1)^2)^(-0.5))*60;

```

## A.2 – Apêndice 2

```

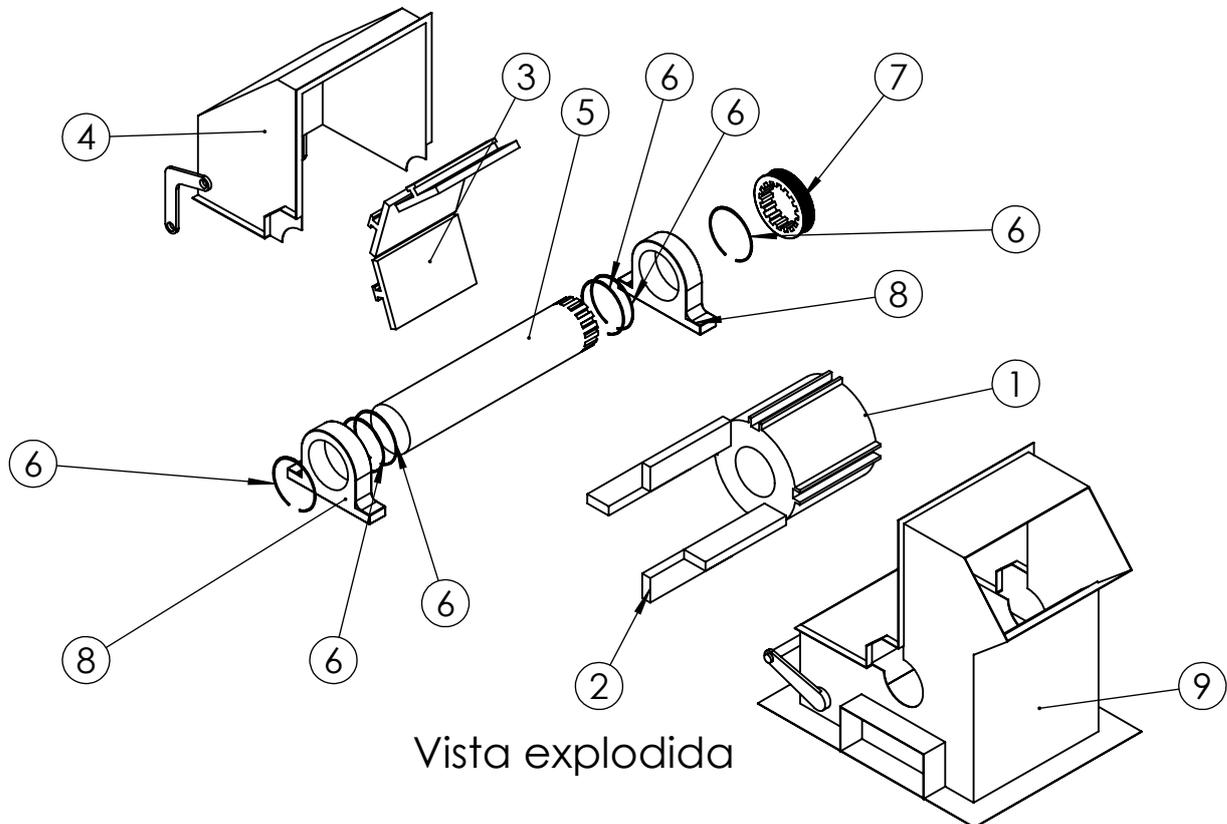
%Projeto de acoplamentos
clear all
close all
clc

%Entradas
H = 4000; %Potência de entrada do motor em CV
n = 1920 ; %Rotação em rpm
F1 = 2.5; %Fator de aplicação para britadores-pedras e minerios
F2 = 1; %Tempo de funcionamento até 16 hrs diariamente
F3 = 1; %Frequência de partidas de até 3 partidas diárias
F4 = 1.2; %Temperatura de funcionamento acima de 75°C
FS = F1*F2*F3*F4;

%Cálculo do Torque
TKM = 7024*H*FS/n;
display(TKM);

```

## A.3 – Apêndice 3



Vista explodida

Nº DO ITEM	Nº DA PEÇA	DESCRIÇÃO	QTD.
1	Rotor	Fundição em ferro fundido	1
2	Martelo	Fundição em ferro fundido branco de alto-cromo	1
3	Anteparo	Fundição em ferro fundido branco de alto-cromo	1
4	Tampa da Carcaca	Chapas de aço ASTM A36 soldadas	1
5	Eixo	Torneamento em aço AISI 1050 normalizado, com fresamento das estrias	1
6	Anel de Retencao	Torneamento	6
7	Polia	Material a definir	1
8	Mancal	Material a definir	2
9	Carcaca	Chapas de aço ASTM A36 soldadas	1



UnB

Faculdade de Tecnologia - FT

Projeto de Graduação

**Projetistas**

Marcos Ximenes

**Data:** 14/06/2018

Fernando Gustavo

**Unidade:** mm

**Desenhista**

Marcos Ximenes

**Escala:** 1 : 100

**Diedro:**

**Tolerâncias Gerais:**

**Material**

**Processo de Fabricação**

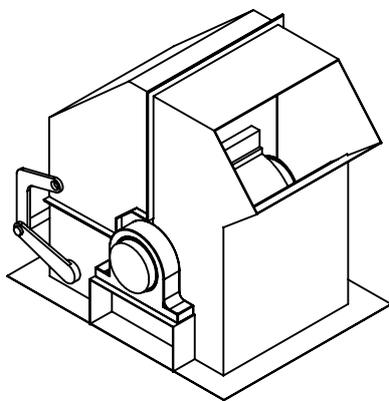
Dimensões

Fêmea

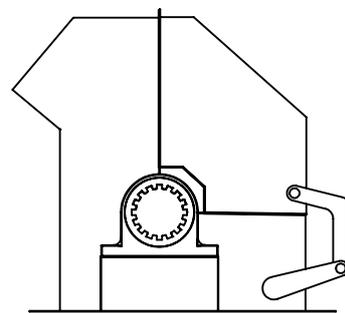
Macho

Britador - Vista explodida





Vista Isométrica

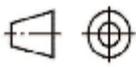


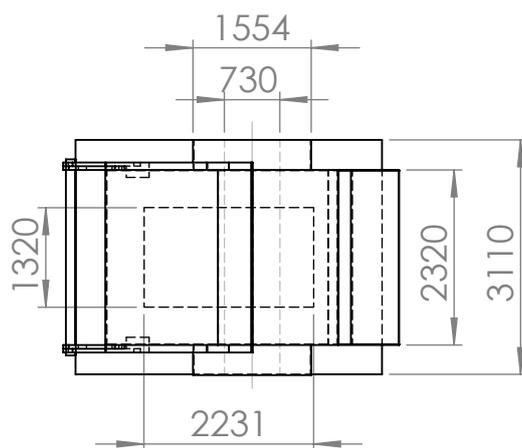
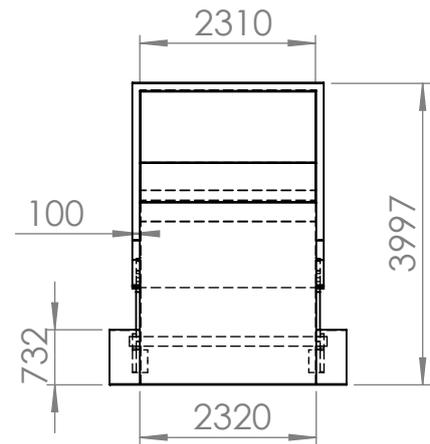
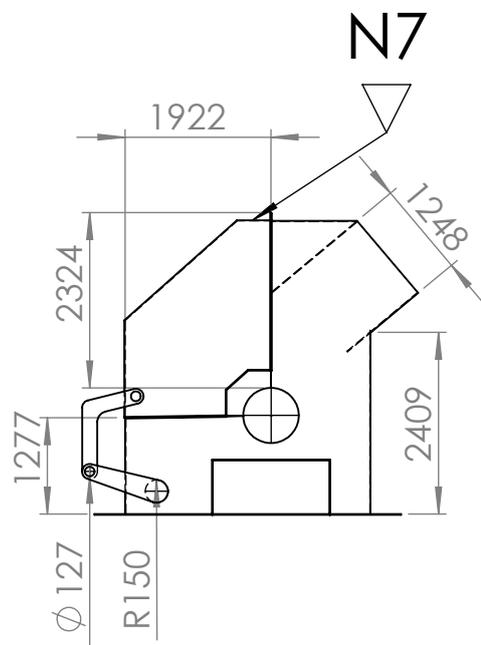
Vista lateral



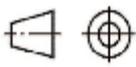
Faculdade de Tecnologia - FT

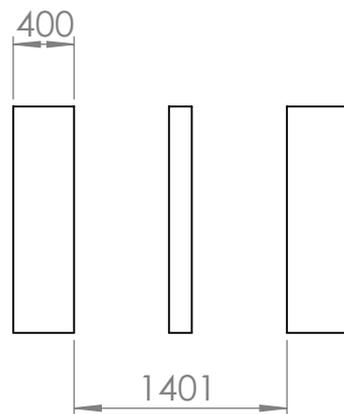
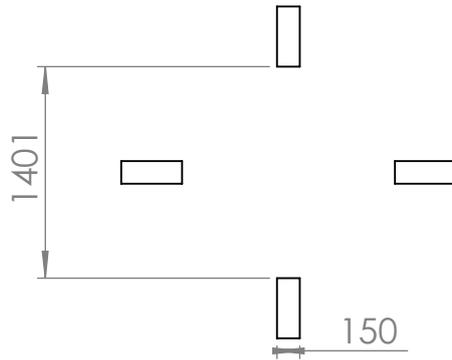
Projeto de Graduação

<b>Projetistas</b>	Marcos Ximenes		<b>Data:</b> 14/06/2018	
	Fernando Gustavo		<b>Unidade:</b> mm	
<b>Desenhista</b>	Marcos Ximenes		<b>Escala:</b> 1 : 100	
<b>Diedro:</b> 	<b>Tolerâncias Gerais:</b>		<b>Material</b>	<b>Processo de Fabricação</b>
	Dimensões	Fêmea	Macho	Britador



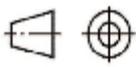
Faculdade de Tecnologia - FT  
Projeto de Graduação

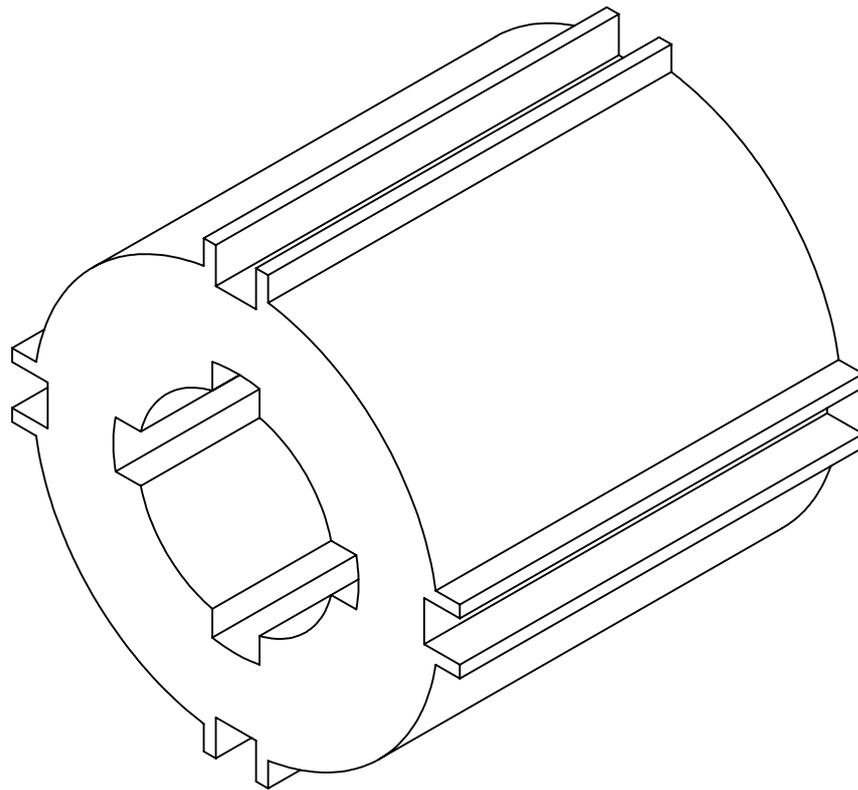
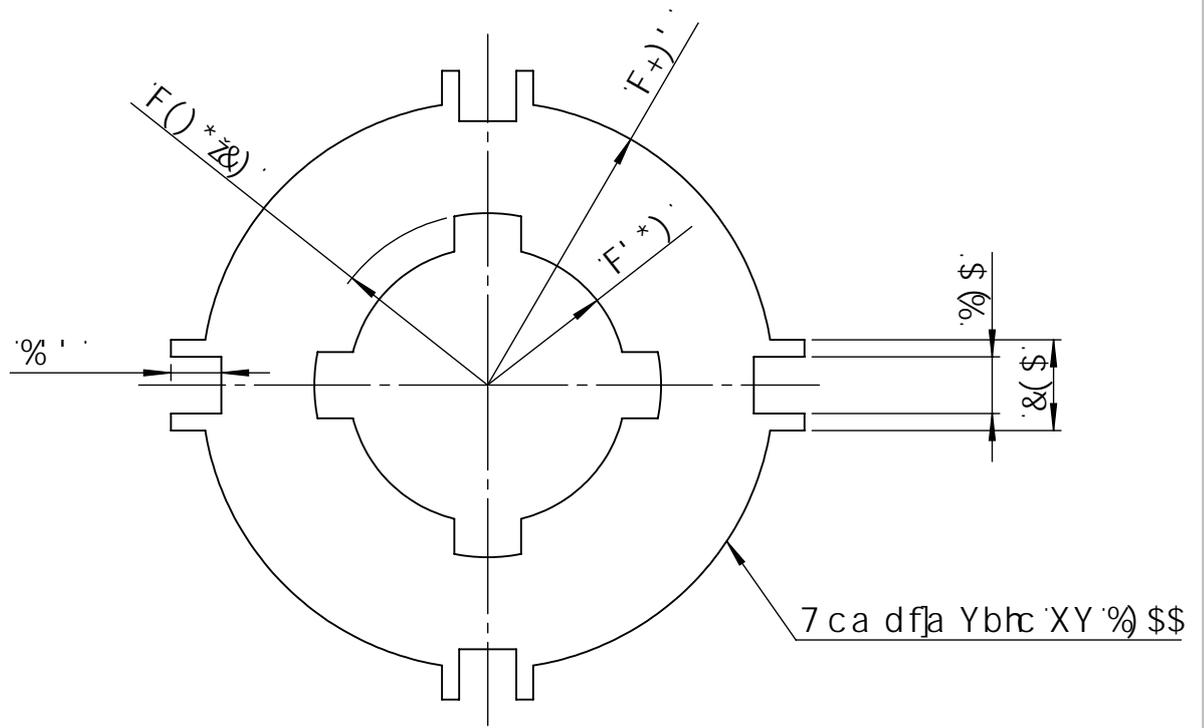
<b>Projetistas</b>	Marcos Ximenes		<b>Data:</b> 14/06/2018
	Fernando Gustavo		<b>Unidade:</b> mm
<b>Desenhista</b>	Marcos Ximenes		<b>Escala:</b> 1:100
<b>Diedro:</b> 	<b>Tolerâncias Gerais:</b>		<b>Material</b> Aço ASTM A36
	<b>Dimensões</b>	<b>Fêmea</b>	
			<b>Processo de Fabricação</b> Fundição
			Carcaça do britador



Faculdade de Tecnologia - FT

Projeto de Graduação

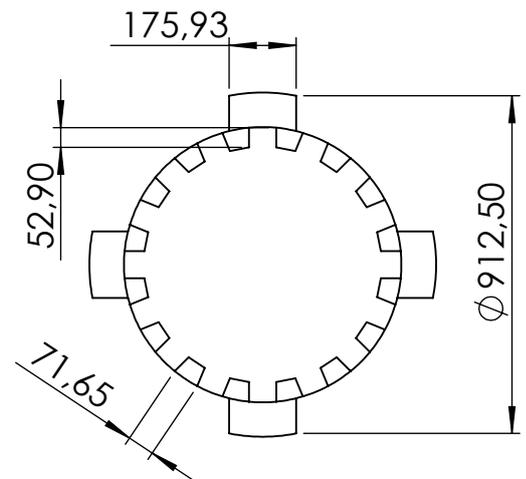
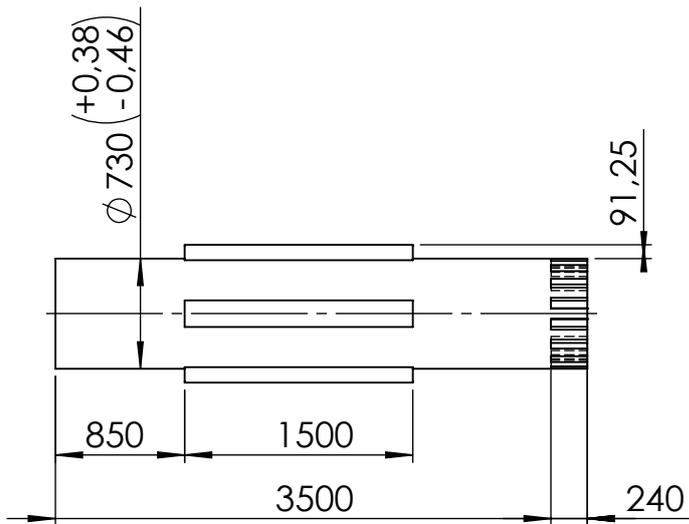
<b>Projetistas</b>	Marcos Ximenes		<b>Data:</b> 14/06/2018		
	Fernando Gustavo		<b>Unidade:</b> mm		
<b>Desenhista</b>	Marcos Ximenes		<b>Escala:</b> 1 : 50		
<b>Diedro:</b> 	<b>Tolerâncias Gerais:</b>		<b>Material</b>	<b>Processo de Fabricação</b>	Martelos
	<b>Dimensões</b>	<b>Fêmea</b>	<b>Macho</b>	Ferro Fundido Branco de alto-cromo	



: UW`XUXYXYHYWbc`c[ ]U! : H

Dfc`Yhc`XY; fUXi U, ~c

<p>Dfc`Yh]g]Ug</p>	<p>T æ&amp; • Áā ^} ^•          Ø!} æ å[ Å~ • æ[</p>	<p>8 UH. FI Æ Æ FI          I b]XUXY. { {</p>													
<p>8 YgYb\ ]g]U</p>	<p>T æ&amp; • Áā ^} ^•</p>	<p>9 gW]U. F Å Æ</p>													
<p>8 ]YXfc.</p> 	<p>Hc`Yf  bW]Ug; YfU]g.</p> <table border="1" data-bbox="414 2060 782 2181"> <tr> <td>8 ]a Ybg" Yg</td> <td>: .a YU</td> <td>A UW c</td> </tr> <tr> <td></td> <td>Ž \$Ž</td> <td>Ž \$</td> </tr> <tr> <td></td> <td>Ž \$</td> <td>! \$Ž</td> </tr> </table>	8 ]a Ybg" Yg	: .a YU	A UW c		Ž \$Ž	Ž \$		Ž \$	! \$Ž	<p>A UHf]U Dfc`Wggc`XY: UVf]WU, ~c</p> <table border="1" data-bbox="782 2060 1300 2181"> <tr> <td>Ø!  Á</td> <td rowspan="2">Ø } åæ[</td> </tr> <tr> <td>Ø } åæ[</td> </tr> </table>	Ø!  Á	Ø } åæ[	Ø } åæ[	<p>Ü[ ç !</p>
8 ]a Ybg" Yg	: .a YU	A UW c													
	Ž \$Ž	Ž \$													
	Ž \$	! \$Ž													
Ø!  Á	Ø } åæ[														
Ø } åæ[															



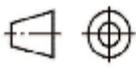
Escala 1 : 20

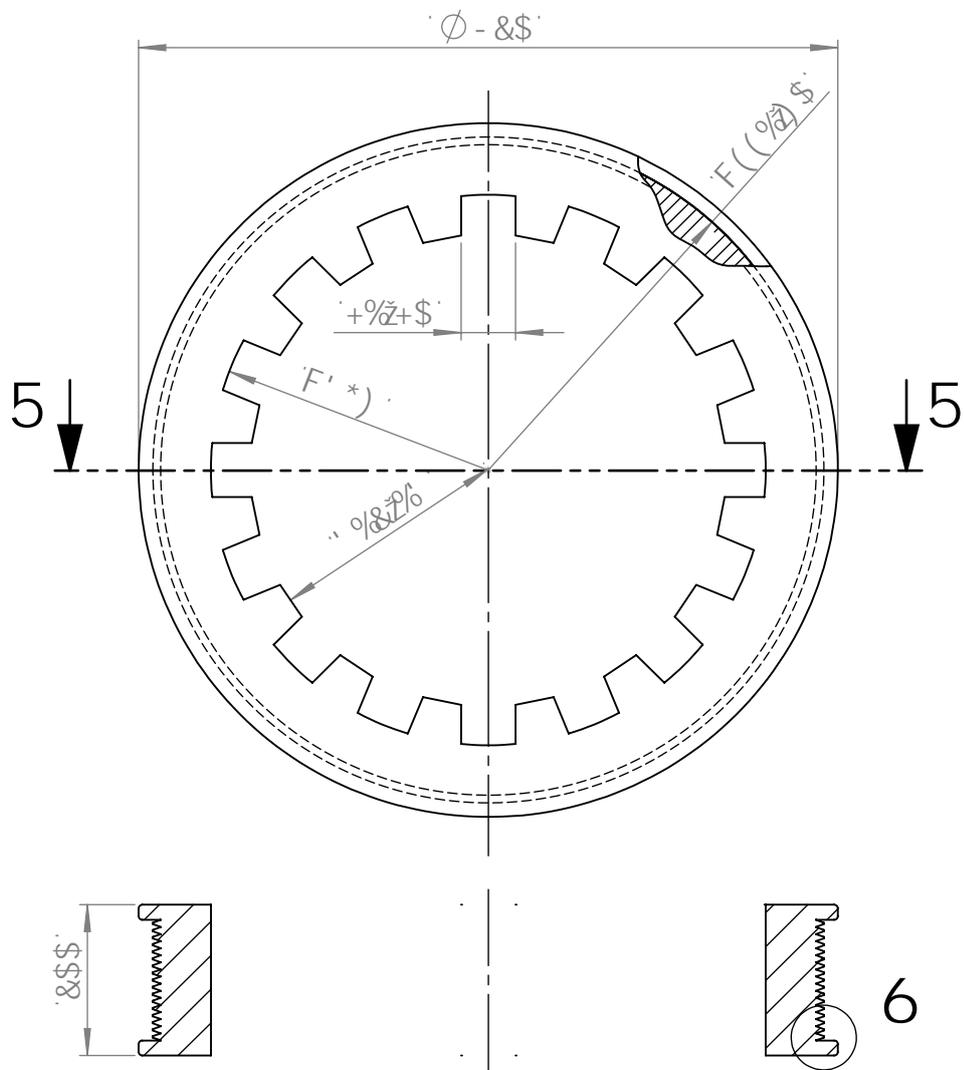
Todos os rasgos de anel possuem diâmetro de 730mm e espessura de 34mm



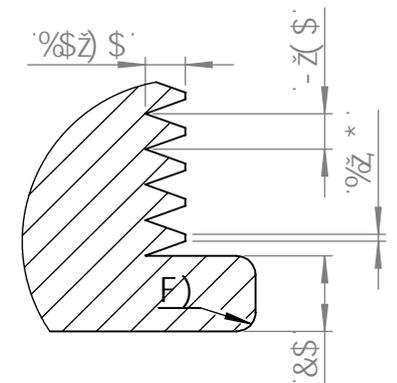
Faculdade de Tecnologia - FT

Projeto de Graduação

<b>Projetistas</b>	Marcos Ximenes		<b>Data:</b> 14/06/2018		
	Fernando Gustavo		<b>Unidade:</b> mm		
<b>Desenhista</b>	Marcos Ximenes		<b>Escala:</b> 1 : 50		
<b>Diedro:</b> 	<b>Tolerâncias Gerais:</b>		<b>Material</b>	<b>Processo de Fabricação</b>	Eixo
	<b>Dimensões</b>	<b>Fêmea</b>	<b>Macho</b>	AISI 1050 Normalizado	
		+0,46 -0,38	+0,38 -0,46		



GY, ~ C 5!5



8 9H5 @ <math>9'</math> 6

9G7 5 @ %: &



: UW`XUXYXYHYWbc`c[ ]U!': H

Dfc`Yhc`XY; fUXi U, ~c

Dfc`Yh]gHJg

T æ& • Áā ^) ^•

8 UH. FI Æ ÆFI

Ø!} æ å[ Å~ • æ[

I b]XUXY. { {

8 YgYbl ]gHJ

T æ& • Áā ^) ^•

9 gWU. FÁÆ

8 ]YXfc.

Hc`Yf| bWUg'; YfUJg.

A UHf]U

Dfc`Wggc`XY: UV]WU, ~c

Ú[ |æe

8 ]a Ybg" Yg

: .a YU

A UW c

ØÁ ^! Å^ -å æ[

ØÁ ^! Å^ -å æ[



Ž Šž

Ž \$

Ž \$

! \$ž