

UNIVERSIDADE DE CAXIAS DO SUL
ÁREA DO CONHECIMENTO DE CIÊNCIAS EXATAS E ENGENHARIAS

GABRIEL BITENCOURT

**DIMENSIONAMENTO DO MECANISMO DE UMA CAÇAMBA TRITURADORA
ACOPLADA A UMA ESCAVADEIRA HIDRÁULICA**

CAXIAS DO SUL

2019

GABRIEL BITENCOURT

**DIMENSIONAMENTO DO MECANISMO DE UMA CAÇAMBA TRITURADORA
ACOPLADA A UMA ESCAVADEIRA HIDRÁULICA**

Trabalho de conclusão do curso de Engenharia Mecânica apresentado à Universidade de Caxias do Sul como pré-requisito parcial para a obtenção do título de Engenheiro Mecânico. Áreas de concentração: projetos de máquinas, mecânica dos corpos sólidos e dinâmica dos corpos rígidos.

Orientador: Prof. Me. Paulo Roberto Linzmaier

CAXIAS DO SUL

2019

GABRIEL BITENCOURT

**DIMENSIONAMENTO DO MECANISMO DE UMA CAÇAMBA TRITURADORA
ACOPLADA A UMA ESCAVADEIRA HIDRÁULICA**

Trabalho de conclusão do curso de Engenharia Mecânica apresentado à Universidade de Caxias do Sul como pré-requisito parcial para a obtenção do título de Engenheiro Mecânico. Áreas de concentração: projetos de máquinas, mecânica dos corpos sólidos e dinâmica dos corpos rígidos.

Aprovado em: 08/07/2019

Banca examinadora

Prof. Me. Paulo Roberto Linzmaier
Universidade de Caxias do Sul - UCS

Prof. Me. Vagner Grison
Universidade de Caxias do Sul – UCS

Prof. Dr. Rodrigo Panosso Zeilmann
Universidade de Caxias do Sul – UCS

AGRADECIMENTOS

Agradeço aos meus pais, Antonio Carlos Bitencourt (*in memoriam*) e Maria do Carmo da Silva Bitencourt, a minhas irmãs Kelly Roberta Bitencourt e Mayara Bitencourt, a minha futura esposa Caroline Rocha Fagundes, e a Alexandre Carnesella que ao longo de todos estes anos de caminhada, nos momentos mais difíceis, sempre estiveram ao meu lado incentivando e proporcionando tudo que estava ao seu alcance para que esta conquista fosse possível.

Aos professores e colegas da Universidade de Caxias do Sul pelos momentos inesquecíveis e pelo conhecimento adquirido. Em especial, um agradecimento ao professor Paulo Roberto Linzmaier, orientador desse trabalho de conclusão de curso.

RESUMO

O mercado de britagem e mineração está em constante crescimento, pois diversas áreas como construção civil, canteiros urbanos e construção de rodovias utilizam o material produzido nas britagens. A demanda pela mobilidade dos equipamentos que fragmentam o material nessa área é alta, no entanto já existem britagens móveis que suprem em parte essa necessidade, porém o custo de transporte e de trabalho podem ser altos. Este trabalho apresenta o resultado do desenvolvimento de um projeto inovador, que une a concha de uma escavadeira hidráulica a um britador de mandíbulas tradicional. A partir dessa união, será possível realizar a fragmentação de materiais em uma caçamba trituradora acoplada a uma escavadeira hidráulica. Foram avaliados elementos críticos desse equipamento, como o eixo excêntrico, os rolamentos e a abanadeira. Os resultados foram obtidos analiticamente e o dimensionamento do mecanismo foi realizado em um *software* de CAD 3D. Esse trabalho tem o potencial de otimizar e facilitar a mobilidade do processo de fragmentação de materiais.

Palavras-chave: *fragmentação, britagem, mineração, mobilidade, caçamba trituradora.*

ABSTRACT

The crushing and mining market is constantly growing, as several areas such as construction, urban construction and highway construction use the material produced in the crushing plants. The demand for the mobility of the equipment that fragments the material in this area is high, however there are already mobile crushers that partially meet this need, but the cost of transportation and work can be high. This work develops an innovative design, which joins the shell of a hydraulic excavator to a traditional jaw crusher. From this union it will be possible to fragment some defined materials, in a crushing bucket coupled to a hydraulic excavator. Critical elements of this equipment were evaluated, such as the eccentric shaft, the bearings and the shaker. The results were obtained analytically and later the mechanism was developed in 3D CAD software. This work has the potential to optimize and facilitate the mobility of the material fragmentation process.

Key-words: *fragmentation, crushing, mining, mobility, crushing bucket.*

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Fratura por compressão	18
Figura 2 – Fragmentação por impacto	18
Figura 3 – Comparação dos mecanismos de fragmentação.....	19
Figura 4 – Britador de mandíbulas	20
Figura 5 - Britador de impacto horizontal	21
Figura 6 – Britador de rolos dentados	23
Figura 7 – Capacidade de produção britadores rolos dentados	24
Figura 8 – Cisalhamento simples ou direto	26
Figura 9 – Variação da tensão de flexão	27
Figura 10 – Flexão assimétrica.....	28
Figura 11 – Eixo maciço submetido a um torque.....	29
Figura 12 – Fluxograma de atividades	33
Figura 13 – Diagrama de corpo livre do queixo.....	37
Figura 14 – Diagrama de corpo livre do eixo excêntrico	38
Figura 15 – Gráfico esforço cortante do eixo excêntrico	39
Figura 16 – Gráfico momento fletor do eixo excêntrico	39
Figura 17 – Dimensões da abanadeira.....	41
Figura 18 – Concha escavadeira e Britador de Mandíbulas	43
Figura 19 – Carcaça da Caçamba Trituradora.....	43
Figura 20 – Queixo da Caçamba Trituradora	44
Figura 21 – Eixo excêntrico da Caçamba Trituradora.....	45
Figura 22 – Abanadeira da Caçamba Trituradora	46
Figura 23 – Caçamba Trituradora.....	47

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Características dos Materiais	17
Tabela 2 – Especificações técnicas britadores de mandíbulas	20
Tabela 3 – Capacidade de produção britadores de mandíbulas (t/h).....	21
Tabela 4 – Especificações técnicas britadores de impacto horizontal.....	22
Tabela 5 – Capacidade de produção britadores de impacto horizontal	22
Tabela 6 – Especificações técnicas de alguns modelos de britadores de rolos dentados	23

LISTA DE SÍMBOLOS

σ	Tensão normal;
τ	Tensão de cisalhamento;
τ méd	Tensão de cisalhamento média;
V	Força de cisalhamento interna resultante;
t	Largura da área da seção transversal do elemento;
Q	Porção superior ou inferior da área da seção transversal do elemento;
P	Força normal interna resultante;
A	Área da seção transversal;
M	Momento interno resultante;
I	Momento de inércia;
I _z	Momento principal de inércia em torno do eixo z;
I _y	Momento principal de inércia em torno do eixo y;
Pe	Potência de eixo;
ω	Velocidade angular;
J	Momento polar de inércia;
T	Torque;
l	Comprimento da barra;
δ	Deformação elástica;
ρ	Distância do raio até determinado ponto;
G	Módulo de elasticidade transversal do material;
θ	Giro angular;
F _p	Força para romper o material;
F _{ad}	Força decomposta da abanadeira;
F _a	Força sobre a abanadeira;
F _r	Força atuante sobre os rolamentos do queixo;
F _{rc}	Força atuante sobre os rolamentos da carcaça;
F _d	Força desbalanceadora;
C	Capacidade de carga dinâmica do rolamento;
L	Vida nominal dos rolamentos;
CA	Carga atuante sobre um rolamento;
P _{cr}	Carga crítica de flambagem;

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	12
1.1	AMBIENTE DE TRABALHO	12
1.2	JUSTIFICATIVA	13
1.3	OBJETIVO GERAL	13
1.4	OBJETIVOS ESPECÍFICOS	13
2	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA.....	15
2.1	CARACTERÍSTICAS DO MATERIAL A SER TRITURADO.....	15
2.1.1	Propriedades	15
2.2	MECANISMOS DE FRAGMENTAÇÃO.....	17
2.2.1	Compressão	17
2.2.2	Impacto	18
2.2.3	Cisalhamento.....	19
2.3	BRITADORES	19
2.3.1	Britador de Mandíbulas.....	19
2.3.2	Britador de Impacto Horizontal.....	21
2.3.3	Britador de Rolos Dentados.....	22
2.4	AÇO HADFIELD	24
2.5	TÓPICOS BÁSICOS DE RESISTÊNCIA DOS MATERIAIS	25
2.5.1	Tração – Compressão	25
2.5.2	Cisalhamento.....	26
2.5.3	Flexão	27
2.5.4	Torção	28
3	MATERIAIS E MÉTODOS	31
3.1	OBJETO DE ESTUDO	31
3.2	PROPOSTA DE IMPLEMENTAÇÃO.....	31
3.2.1	Método	31
3.2.2	Fluxograma das atividades	32
3.3	REQUISITOS DE PROJETO	33
3.4	DEFINIÇÃO DO MECANISMO	34

4	RESULTADOS	36
4.1	DIMENSIONAMENTO ANALÍTICO DOS ELEMENTOS CRÍTICOS.....	36
4.1.1	Eixo excêntrico	36
4.1.2	Vida dos Rolamentos	40
4.1.3	Abanadeira	41
4.2	ETAPAS DO PROJETO.....	42
5	CONCLUSÃO	48
6	TRABALHOS FUTUROS	49
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	50

1 INTRODUÇÃO

A busca por processos mais eficientes e econômicos é uma constante na área de fragmentação de minerais e entulhos da construção civil. A operação de fragmentação de minerais e entulhos une um conjunto de técnicas que tem por finalidade reduzir, por ação mecânica externa e algumas vezes interna, um sólido, de determinado tamanho em fragmentos de tamanho menor (FIGUEIRA; LUZ; ALMEIDA, 2010).

No mercado atual existem equipamentos capazes de realizar a trituração de diversos materiais. Alguns exemplos são: britador de mandíbula, britador giratório, britador cônico, britador de impacto, britador de martelos, entre outros. A objeção é que dependendo da aplicação, esses britadores tem um custo elevado e necessitam de um lugar específico e adequado para serem instalados, dificultando a sua mobilidade.

Neste trabalho foi apresentada uma proposta para o dimensionamento do mecanismo de uma caçamba trituradora acoplada a uma escavadeira hidráulica. A ideia é que esse equipamento realize a mesma função de fragmentar os materiais que os britadores realizam, porém de forma mais prática, podendo ser transportado e adaptado a escavadeira hidráulica.

De forma alguma a caçamba trituradora poderá substituir totalmente os britadores tradicionais, pois depende muito da aplicação. Em produções de grande escala, como na maioria das mineradoras a caçamba trituradora poderá auxiliar em algumas fases do processo, mas não conseguirá operar sozinha com grandes demandas.

O ponto mais forte do equipamento proposto é a eficiência aliada a facilidade de transporte, podendo ser empregada nas seguintes áreas: canteiros urbanos, demolições, obras rodoviárias, reciclagem e britagens.

1.1 AMBIENTE DE TRABALHO

A empresa Brimaq Britadores e Máquinas, na qual será realizado o presente projeto é uma empresa de médio porte, localizada em Caxias do Sul – RS.

Fundada há 16 anos, a Brimaq tem como foco principal a fabricação e reforma de equipamentos de mineração. A empresa fabrica britadores de mandíbulas, britadores cônicos, alimentadores vibratórios, peneiras vibratórias, calhas vibratórias, esteiras transportadoras e carretas móveis. No setor de reforma e manutenção a empresa trabalha com todas as marcas e equipamentos de mineração existentes no mercado.

Na região sul nos dias atuais existem poucas empresas que atuam nessa área, principalmente na parte de reforma e manutenção, por se tratar de um serviço melindroso. Os principais clientes situam-se no estado do Rio Grande do Sul, mas também são atendidos os estados do Paraná e Santa Catarina.

1.2 JUSTIFICATIVA

As empresas e as pessoas cada vez mais precisam trabalhar de forma eficiente e com produtos compactos e inovadores. Atualmente a empresa Brimaq Britadores e Máquinas fabrica britagens fixas e móveis capazes de triturar minérios e entulhos da construção civil, porém conforme a aplicação uma britagem completa pode ter um custo elevado.

Pensando nisso a empresa considera a possibilidade do desenvolvimento de uma caçamba trituradora acoplada a uma escavadeira hidráulica. Como a maioria dos clientes que trabalham com a área de trituração de minérios e entulhos já possuem uma escavadeira, o custo ficará mais baixo para fragmentar o material, pois será necessário adquirir somente a caçamba trituradora, e a facilidade de transporte aumentará consideravelmente.

A união entre o britador tradicional e a concha da escavadeira passará por uma avaliação criteriosa, pois esses dois equipamentos serão transformados em uma única máquina, e ambos necessitam manter as suas funcionalidades. Elementos críticos presentes no equipamento, como o eixo principal e os rolamentos, serão avaliados analiticamente para definir um dimensionamento adequado.

1.3 OBJETIVO GERAL

Dimensionar o mecanismo de uma caçamba trituradora acoplada a uma escavadeira hidráulica.

1.4 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

Os objetivos específicos são:

- a) estudo conceitual do movimento que o mecanismo necessita realizar para triturar o material;
- b) estudo do mecanismo dos britadores tradicionais para posterior comparação;
- c) definição do mecanismo a ser utilizado na caçamba trituradora;

- d) dimensionamento analítico dos elementos críticos;
- e) propor um mecanismo compacto e eficiente, capaz de triturar o material, acoplado ao braço da escavadeira hidráulica.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

A revisão bibliográfica tem como objetivo abordar os principais conceitos para o desenvolvimento deste trabalho, comprovando assim através da literatura, a aplicabilidade do estudo proposto.

2.1 CARACTERÍSTICAS DO MATERIAL A SER TRITURADO

A grande maioria dos minerais são materiais cristalinos, com os átomos em arranjos tridimensionais. As ligações interatômicas são eficientes a pequena distância, e podem ser rompidas se tensionadas por forças externas. Nas partículas, as principais regiões de fraqueza estrutural são as trincas pré-existentes de algum processo de fragmentação anterior. As tensões que provocam a ruptura concentram-se na extremidade da trinca. Quando a tensão supera as energias de ligação química a partícula se rompe (LUZ; SAMPAIO; ALMEIDA, 2004). A seguir serão apresentadas as principais propriedades que influenciam no processo de fragmentação.

2.1.1 Propriedades

Os materiais que podem passar pelo processo de fragmentação apresentam diversas propriedades. Nessa seção serão apresentadas as principais e que mais influenciam no processo. A dureza, a tenacidade e a abrasividade são propriedades fundamentais e que devem ser analisadas de forma criteriosa sempre que deseja-se escolher um tipo de britador para determinada aplicação.

Quando submetidos a uma força externa destrutiva, os minerais se rompem. Existem diversas maneiras de rompimento físico, sendo, clivagem e fratura típicas (PERONI, 2008).

Define-se que o material rompeu em função da clivagem quando produz superfícies planas. Esta é uma propriedade direcional e qualquer plano paralelo através do cristal é um plano de clivagem potencial. Quando o material não se parte por clivagem, pode-se dizer que o rompimento ocorreu por fratura, ou seja, entende-se por fratura de um mineral a maneira pela qual ele se rompe quando isso não ocorre ao longo da superfície de clivagem (PERONI, 2008).

A quantidade de argila e umidade presente nos materiais a serem britados influenciam negativamente na operação de alguns tipos de equipamentos de fragmentação. Britadores

cônicos, giratórios e de mandíbulas são altamente sensíveis à presença de argila e umidade, podendo diminuir a produção e em casos mais graves ocorrer a quebra do equipamento (FIGUEIRA; LUZ; ALMEIDA, 2010).

Segundo Peroni (2008) e, posteriormente Galery (2011), a tenacidade mede a resistência de um mineral em relação ao rompimento por tração, compressão ou impacto. É uma medida da quantidade de energia que um material pode absorver antes de fraturar. A tenacidade dos minerais é expressa em termos qualitativos e com uma linguagem padronizada: quebradiço, maleável, séctil, flexível e elástico.

Para Peroni (2008), a dureza está diretamente relacionada com a força de ligação dos átomos, íons ou moléculas que forma a estrutura. Quanto mais forte a força de ligação entre os átomos mais duro será o mineral. A escala de Mohs é um dos principais índices de dureza utilizados, na qual são atribuídos valores de 1 a 10, sendo o valor de 1 o material menos duro, representado pelo talco, e o valor de 10 dado ao material mais duro conhecido na natureza, o diamante.

Conforme Carvalho (2012), a fragmentação das partículas ocorre pelo rompimento das forças de coesão ao longo das superfícies que se formam. Galery (2011) afirma que as forças de coesão interna influenciam na característica do produto fragmentado, mas a intensidade e a forma de energia aplicada determinarão o tamanho final das partículas.

A abrasividade é a capacidade que um material possui de desgastar, por fricção, outro material. Deve-se analisar a abrasividade com a finalidade de evitar altos custos de manutenção nos equipamentos. Os britadores de rolos dentados e os britadores de impacto horizontal apresentam alto custo de manutenção se trabalhar com material altamente abrasivo. Normalmente quando deseja-se fragmentar materiais com alto índice de abrasividade, os britadores de mandíbulas são os mais recomendados. A seguir são explicitados alguns exemplos de valores de abrasividade (METSU, 2005).

- a) abrasividade alta: índice de abrasão acima de 0,5, por exemplo, granito, quartzito e gnaisse;
- b) abrasividade média: índice de abrasão entre 0,2 e 0,4, por exemplo, basalto e diabásio;
- c) não abrasivo: índice de abrasão menores que 0,1, por exemplo, calcários e dolomitas.

Na tabela a seguir é possível comparar as características de alguns materiais que podem passar pelo processo de fragmentação.

Tabela 1 – Características dos Materiais

Material	Dureza (Mohs)	Resistência a tração (MPa)	Resistência ao cisalhamento (MPa)	Resistência a compressão (MPa)
Basalto	4,0 - 6,5	10 - 30	14 - 55	110 - 338
Granito	5,0 - 7,0	7 - 25	9 - 38	96 - 310
Calcário	2,0 - 5,0	5 - 25	3 - 36	14 - 255
Quartzito	4,0 - 7,0	10 - 30	8 - 31	207 - 627
Arenito	2,0 - 7,0	4 - 25	5 - 16	13 - 16

Fonte: Adaptado de MatWeb (2018)

2.2 MECANISMOS DE FRAGMENTAÇÃO

Para Carvalho (2012), a redução de tamanho ou fragmentação é uma técnica muito importante no processamento mineral. Visa principalmente adequar especificações de granulometria exigidas pelo mercado, como, por exemplo, a fragmentação de rochas como o granito e o calcário para produção de brita.

A seguir serão apresentados os três principais mecanismos de fragmentação.

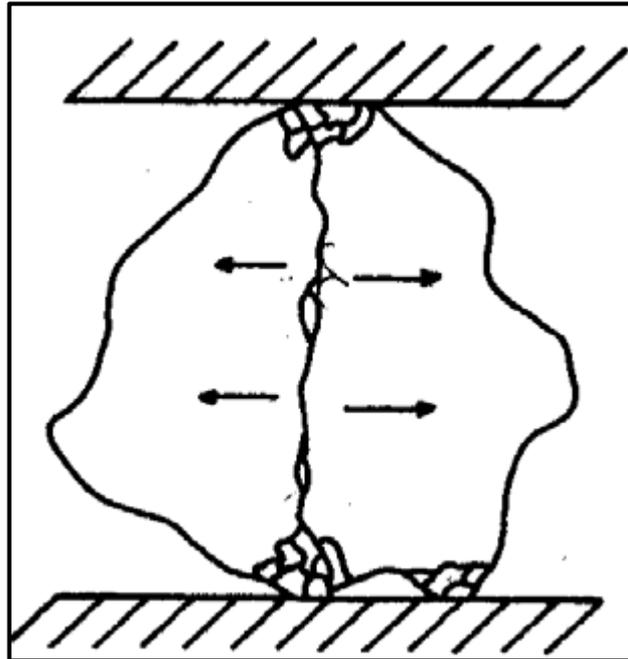
2.2.1 Compressão

A fragmentação ocorre quando forças de compressão, de baixa intensidade, são aplicadas lentamente e progressivamente, permitindo assim que, com o surgimento da fratura, o esforço seja aliviado. De maneira geral as forças de compressão são pouco superiores à resistência das partículas ou blocos rochosos (GALLERY, 2011).

Segundo Varela et al. (2015), a determinação da resistência a compressão dos materiais a serem triturados é fundamental para a seleção de britadores e definição dos seus parâmetros de projeto.

Como pode ser visualizado na Figura 1, quando partículas irregulares são sujeitas a quebra por compressão, o material final se apresenta em duas faixas de tamanho: partículas grossas sendo o resultado da quebra por tensão, e partículas finas resultado da quebra por compressão no local aonde a carga é aplicada (LUZ; SAMPAIO; ALMEIDA, 2004).

Figura 1 – Fratura por compressão



Fonte: Luz; Sampaio; Almeida (2004)

2.2.2 Impacto

A fratura nesse mecanismo ocorre quando forças são aplicadas de forma rápida e intensidade muito superior à resistência das partículas. Em geral faz uso da energia cinética de corpos em movimentos circulares. O resultado desse tipo de fragmentação é uma vasta faixa de granulometria das partículas, sendo capaz de produzir material fino em grandes quantidades (FIGUEIRA; LUZ; ALMEIDA, 2010).

Segundo Valadão e Araujo (2007), este mecanismo é o mais eficiente em termos de utilização de energia, mas a sua aplicação é limitada a materiais menos abrasivos.

Figura 2 – Fragmentação por impacto



Fonte: Metso (2005)

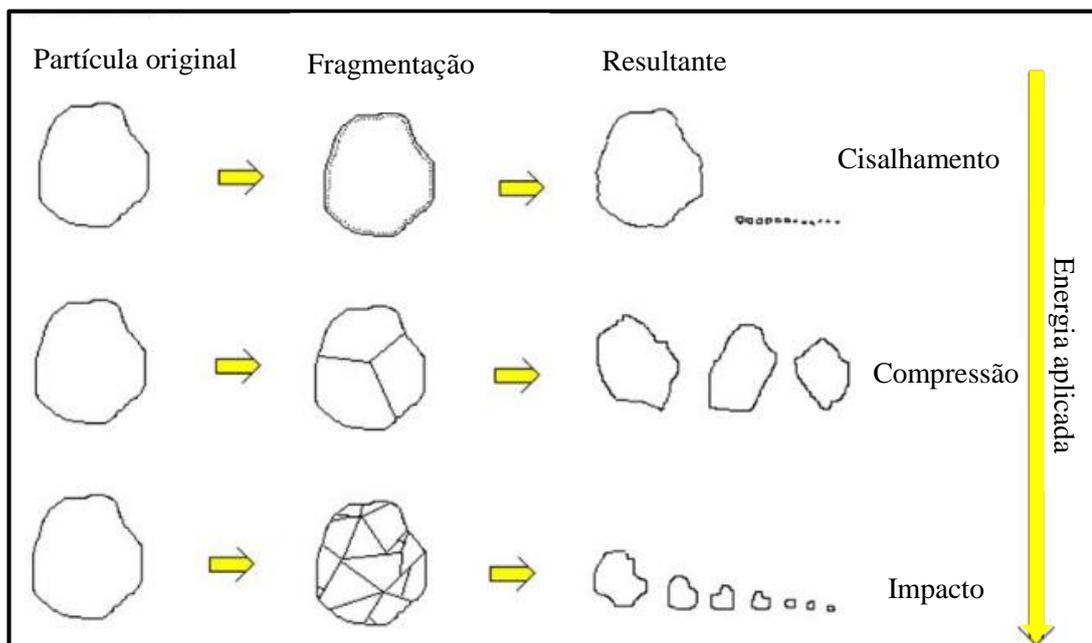
2.2.3 Cisalhamento

Nesse mecanismo as forças aplicadas não são suficientes para provocar fraturas ao longo da partícula. Prepondera uma concentração de esforços localizados na área periférica, principalmente na superfície de contato das partículas, surgindo assim pequenas fraturas (GALERY, 2011).

Conforme Figueira, Luz e Almeida (2010), esse mecanismo tem um consumo muito elevado de energia e produz uma grande quantidade de partículas super finas.

A seguir na Figura 3, é possível comparar os mecanismos de impacto, compressão e cisalhamento, quanto a quantidade de energia utilizada e os tipos de partículas geradas.

Figura 3 – Comparação dos mecanismos de fragmentação



Fonte: Carvalho (2012)

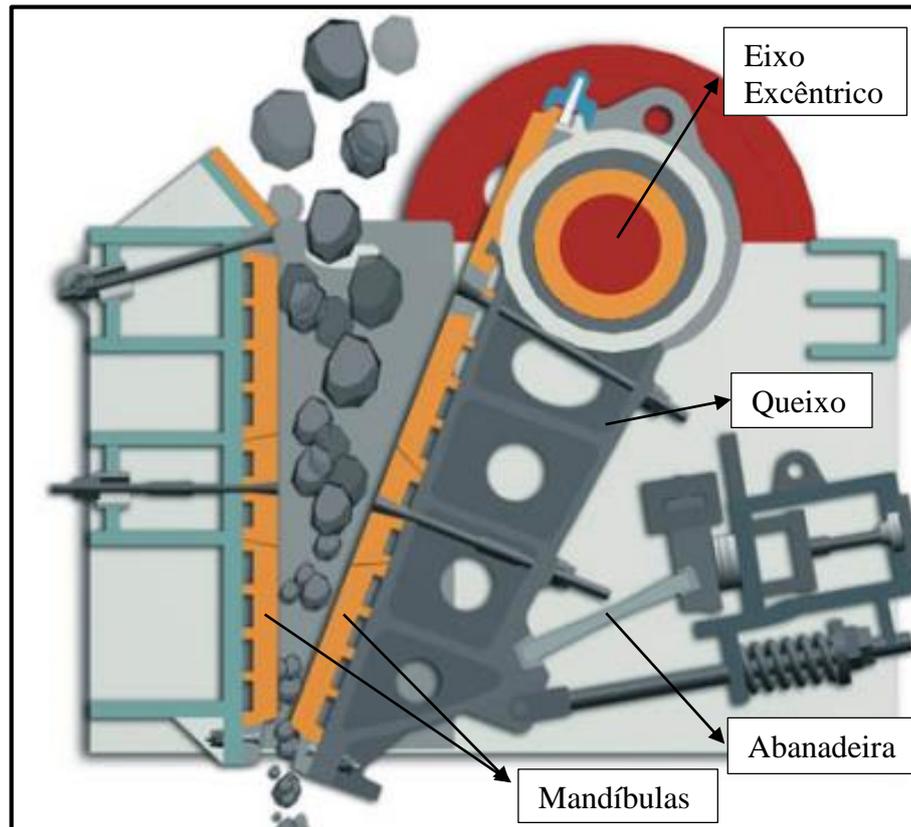
2.3 BRITADORES

2.3.1 Britador de Mandíbulas

Britadores de mandíbulas são utilizados quando deseja-se fragmentar blocos de elevadas durezas e dimensões, produz um material final pouco uniforme e tem uma razão de redução em torno de 6:1. Oferece boa facilidade de manutenção e substituição das peças de desgaste (FIGUEIRA; LUZ; ALMEIDA, 2010)

Nos britadores de mandíbulas o material é triturado pela combinação dos mecanismos de compressão e cisalhamento. Como é possível visualizar na Figura 4, esse equipamento possui duas mandíbulas, uma fixa e uma móvel, ambas fabricadas em aço Hadfield. A móvel é apoiada no queixo que é ligado a um eixo excêntrico que garante um movimento elíptico capaz de fragmentar o material ao longo da câmara de britagem METSO (2005).

Figura 4 – Britador de mandíbulas



Fonte: Carvalho (2012)

As tabelas 2 e 3 fornecem as especificações técnicas e a capacidade de produção de alguns modelos de britadores de mandíbulas específicos.

Tabela 2 – Especificações técnicas britadores de mandíbulas

Modelos	Unid.	Britadores Primários			
		2015E	3020E	4230E	6240E
Boca	mm	200 x 150	300 x 200	420 x 300	620 x 400
Peso	kg	545	1720	3000	7000
Volante - diâmetro	mm	750	800	900	1075
Rotação	rpm	380	350	350	280
Motor - 1200 rpm	hp	10	15	25	40

Fonte: Metso (2005)

Tabela 3 – Capacidade de produção britadores de mandíbulas (tonelada/h)

Máquina	Abertura de saída - posição fechada APF - mm (pol.)							
	6 (1/4")	12 (1/2")	20 (3/4")	30 (1 3/16")	40 (1 5/8")	50 (2")	75 (3")	100 (4")
2015	2 - 3	3 - 5	5 - 6,5	6 - 8	8 - 10			
3020			8 - 10	9 - 13	14 - 16	17 - 22		
4230				12 - 16	16 - 20	20 - 25	25 - 33	
6240				25 - 35	35 - 45	45 - 58	65 - 85	70 - 88

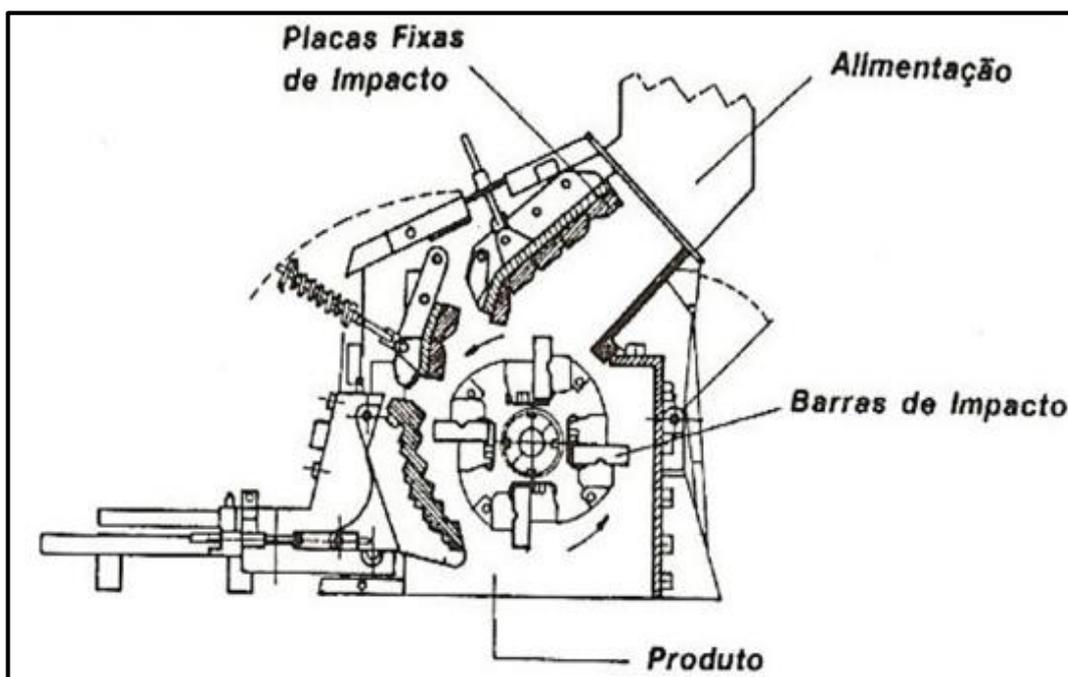
Fonte: Metso (2005)

2.3.2 Britador de Impacto Horizontal

Os britadores de impacto horizontal são amplamente utilizados quando necessita-se produzir material final fino e com formato cúbico, a razão de redução pode variar de 6:1 até 40:1. Tem excelente capacidade de produção, porém um ponto negativo é o grande desgaste que as peças de reposição sofrem por abrasão, tornando assim o custo de manutenção alto (METSO, 2005).

Conforme Carvalho (2012), nesse tipo de britador a fragmentação ocorre por impacto. O equipamento é constituído por uma carcaça de chapas de aço que contém um conjunto de eixo e rotor. Por meio do movimento dos martelos acoplados ao rotor, ilustrados na Figura 5, parte da energia cinética é transferida para o material, projetando-o assim contra as placas fixas ocorrendo a fragmentação (FIGUEIRA; LUZ; ALMEIDA, 2010).

Figura 5 - Britador de impacto horizontal



Fonte: Metso (2005)

Nas tabelas 4 e 5 são fornecidas as especificações técnicas e a capacidade de produção de alguns modelos de britadores de impacto horizontal.

Tabela 4 – Especificações técnicas britadores de impacto horizontal

Modelo	Abert. de aliment. (mm)	Tamanho máx. de alim. (mm)	Rotação máx. (rpm)	Potência kW (hp)
NP 1007	750 X 800	500	800	90 (125)
NP1110	1020 x 820	600	800	160 (220)
NP1213	1320 x 880	600	700	200 (250)
NP1315	1540 x 930	600	700	250 (350)
NP1520	2040 x 995	700	600	400 (600)
NP1210	1020 x 1080	800	700	160 (220)
NP1313	1320 x 1200	900	700	200 (250)
NP1415	1540 x 1320	1000	600	250 (350)
NP1620	2040 x 1630	1300	500	400 (600)
NP2023	2400 x 1920	1500	500	1000 (1200)

Fonte: Metso (2005)

Tabela 5 – Capacidade de produção britadores de impacto horizontal

Modelo	TAM. MÁX. DE ALIMENT. 400mm		TAM. MÁX. DE ALIMENT. 200mm	
	Produto final (t/h)			
	< 60 mm	< 40 mm	< 40 mm	< 20 mm
NP 1007	150	100	150	80
NP 1110	200	150	250	150
NP 1213	250	200	300	200
NP 1315	350	250	350	250
NP 1520	500	400	600	350
Modelo	TAM. MÁX. DE ALIMENT. 800mm		TAM. MÁX. DE ALIMENT. 600mm	
	Produto final (t/h)			
	< 200 mm	< 100 mm	< 200 mm	< 100 mm
NP 1210	350	250	350	250
NP 1313	450	300	500	350
NP 1415	550	400	600	400
NP 1620	900	600	950	650
NP 2023	1800	1200	2000	1300

Fonte: Metso (2005)

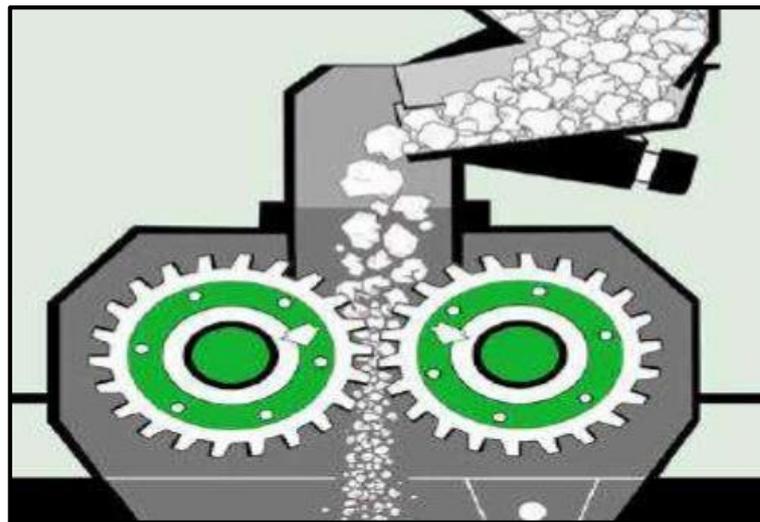
2.3.3 Britador de Rolos Dentados

Os britadores de rolos dentados são especialmente destinados a processos que necessita-se obter produto final médio ou fino, com uma razão de redução que varia de 3:1 a

7:1. São aplicados normalmente para materiais de média e baixa dureza, como: bauxita, carvão mineral e vegetal, sínter, dolomita e grafite (METSO, 2005).

Segundo Wills e Napier-munn (2006), o material é triturado por compressão e cisalhamento em função do movimento de rotação que cada um dos rolos realiza individualmente e em sentidos opostos, conforme a Figura 6.

Figura 6 – Britador de rolos dentados



Fonte: Geronimo (2008)

Para Figueira, Luz e Almeida (2010), o emprego desse tipo de britador é limitado devido ao grande desgaste que os dentes sofrem por abrasão, porém tem um diferencial por ter uma alta tolerância à umidade do material a ser fragmentado. O custo de operação desse britador pode ser tornar alto, em função do desgaste sofrido nos dentes.

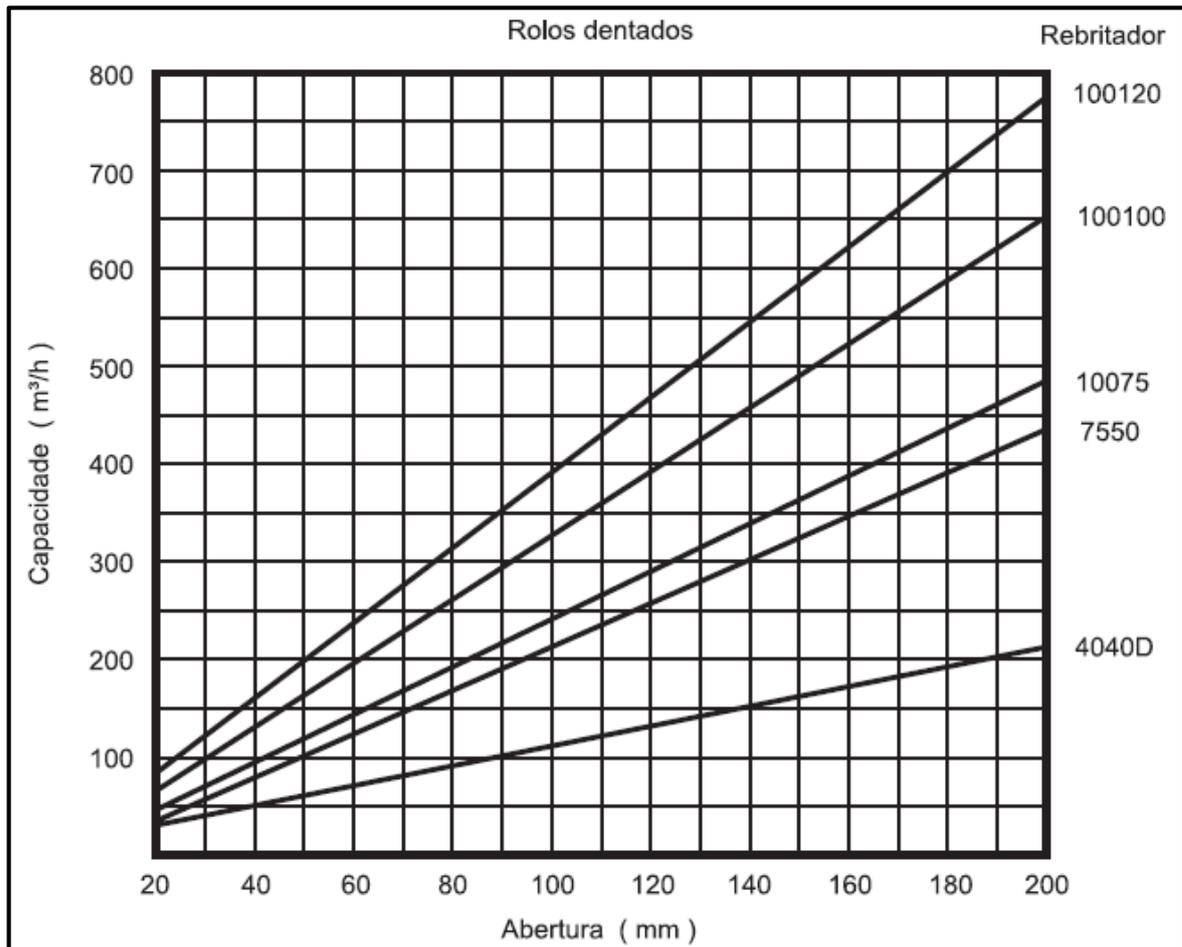
Conforme a tabela de especificação e o gráfico de produção a seguir, pode-se concluir que os britadores de rolos dentados possuem uma elevada taxa de produção.

Tabela 6 – Especificações técnicas de alguns modelos de britadores de rolos dentados

Máquina		10075		100100		100120	
		Liso	Dentado	Liso	Dentado	Liso	Dentado
Motor	hp	2 x 30	2 x 40	2 x 40	2 x 50	2 x 50	2 x 60
Peso s/ motor	t	11	11	14	14	16	16
Larg. dos rolos	mm	750	750	1000	1000	1200	1200

Fonte: Metso (2005)

Figura 7 – Capacidade de produção britadores rolos dentados



Fonte: Metso (2005)

2.4 AÇO HADFIELD

O aço manganês austenítico, ou aço Hadfield, tem extensa aplicação na área de fragmentação de materiais como minerais e entulhos da construção civil. As peças fabricadas nesse aço são geralmente submetidas à abrasão e ao impacto, por possuir propriedades de endurecimento superficial propiciado pelo trabalho e elevada tenacidade (BAL, 2018).

Zhang (2006), em seus estudos afirma que os aços Hadfield são conhecidos pela sua notável capacidade de encruamento. A superfície forma uma forte camada endurecida, com maior dureza ao ser deformada pelo impacto, enquanto no seu interior a tenacidade permanece alta. Normalmente a especificação para esse tipo de aço tem 10-14% de manganês e 1,0-1,4% de carbono, sendo totalmente austenítico em condições normais, com dureza média de 50 HRC.

Na indústria de mineração, é amplamente aceito que a resistência ao desgaste abrasivo dos aços Hadfield depende da presença de impacto durante a operação de fragmentação. Em aplicações de britagem, o desgaste abrasivo pode ser associado ao impacto moderado ou

nenhum impacto, dependendo do equipamento e da configuração do circuito. A presença de impacto é importante porque a deformação é um pré-requisito necessário para o trabalho de endurecimento dos aços Hadfield (LENCINA et al., 2015).

Segundo Schroeder (2015), o endurecimento dos aços Hadfield pode ser explicado pelos seguintes fenômenos:

- a) em temperaturas elevadas, frente à temperatura de transformação martensítica, pode ocorrer o escorregamento das discordâncias gerando assim barreiras para a própria movimentação das demais;
- b) em temperaturas mais baixas, pode ocorrer o fenômeno chamado de maclação, essas maclas formadas bloqueiam a movimentação das discordâncias;
- c) em temperaturas ainda mais baixas o fenômeno de transformação martensítica passa a prevalecer, nesse caso ocorre uma mudança na estrutura cristalina. De maneira semelhante a uma macla, a martensita tem, por consequência, o bloqueio da movimentação das discordâncias.

2.5 TÓPICOS BÁSICOS DE RESISTÊNCIA DOS MATERIAIS

Por definição, a resistência dos materiais estuda as relações entre cargas externas aplicadas a um corpo deformável e a intensidade das forças internas que agem no interior do corpo. Em qualquer projeto, seja de estrutura ou máquina, é de suma importância determinar as forças que agem sobre os vários elementos, bem como no seu interior (HIBBELER, 2010).

2.5.1 Tração – Compressão

Segundo Hibbeler (2010), quando uma força é aplicada perpendicularmente a uma determinada área, origina-se uma tensão normal, conforme mostrado na equação 1. Se a força normal ou tensão comprimir o elemento de área, será denominada tensão de compressão, ao passo que, se tracionar o elemento, será denominada tensão de tração.

$$\sigma = \frac{P}{A} \quad (1)$$

Nesta equação, σ é a tensão normal média [MPa]; P se refere a força normal interna resultante [N]; e A é a área em que a força é aplicada [mm²].

2.5.2 Cisalhamento

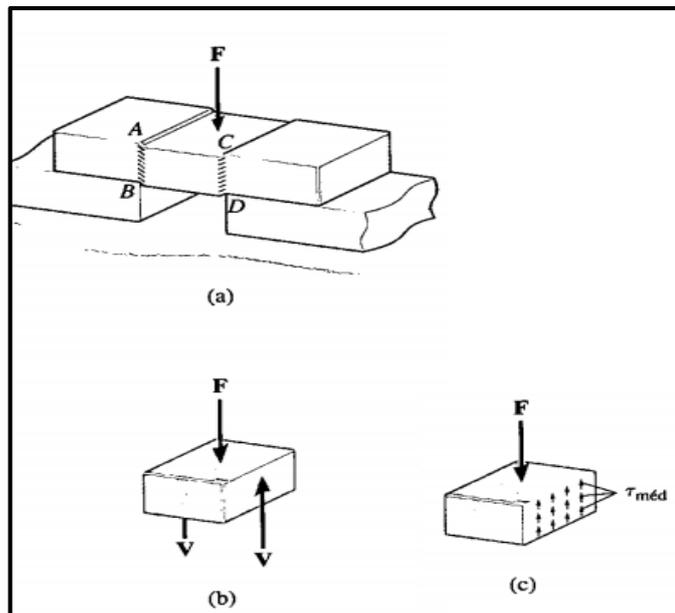
Para Hibbeler (2010), a tensão de cisalhamento é a força por unidade de área, ou a intensidade da força que age tangente ao plano da área seccionada. A tensão de cisalhamento média pode ser definida pela equação 2.

$$\tau_{méd} = \frac{V}{A} \quad (2)$$

Onde, $\tau_{méd}$ é a tensão de cisalhamento média na seção [MPa]; V é a força de cisalhamento interna resultante [N]; e A é a área da seção [m²].

O caso de carregamento da Figura 8, é um exemplo de cisalhamento simples ou direto, já que o cisalhamento é causado pela ação direta da carga aplicada F .

Figura 8 – Cisalhamento simples ou direto



Fonte: Hibbeler (2010)

A equação 3 deve ser utilizada quando deseja-se calcular a tensão de cisalhamento em um ponto específico da seção, onde o resultado de uma distribuição de tensão de cisalhamento transversal age na seção transversal da viga. Pode-se definir numericamente esse tipo de carregamento conforme a equação 3 (HIBBELER, 2010).

$$\tau = \frac{VQ}{It} \quad (3)$$

Nesta equação, τ é a tensão de cisalhamento no elemento no ponto localizado à distância y' do eixo neutro [MPa]; V se refere a força de cisalhamento interna resultante [N]; I é o momento de inércia da área da seção transversal inteira, calculada em torno do eixo neutro [m⁴]; t refere-se a largura da área da seção transversal do elemento [m]; por fim Q é o momento estático da seção acima do ponto onde deseja-se calcular a tensão [m³].

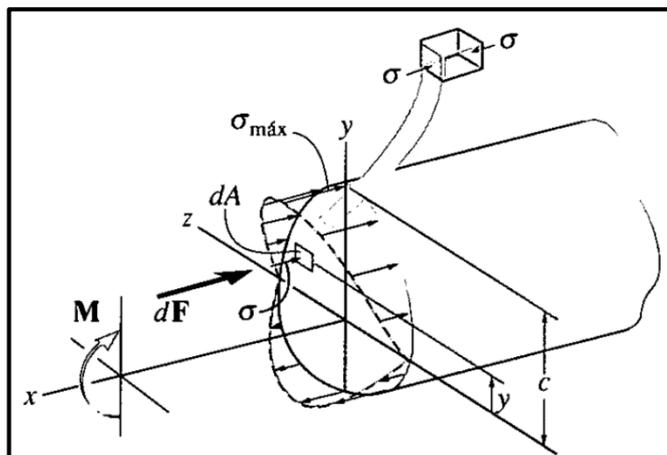
2.5.3 Flexão

Conforme Hibbeler (2010), um momento fletor tende a produzir uma variação linear da deformação normal no interior de uma viga, para isso o material tem que ser homogêneo e a lei de Hooke tem que ser respeitada. O equilíbrio pode ser usado para relacionar o momento interno na viga com a distribuição de tensão. Com o auxílio da Figura 9, é possível compreender com maior clareza a equação 4 de flexão simétrica.

$$\sigma = -\frac{M_y}{I} \quad (4)$$

Onde, σ é a tensão normal no elemento [MPa]; M se refere ao momento interno resultante [N.m]; I é o momento de inércia da área da seção transversal calculada em torno do eixo neutro [m⁴]; e y refere-se a distância perpendicular do eixo neutro a um ponto determinado [m].

Figura 9 – Variação da tensão de flexão



Fonte: Hibbeler (2010)

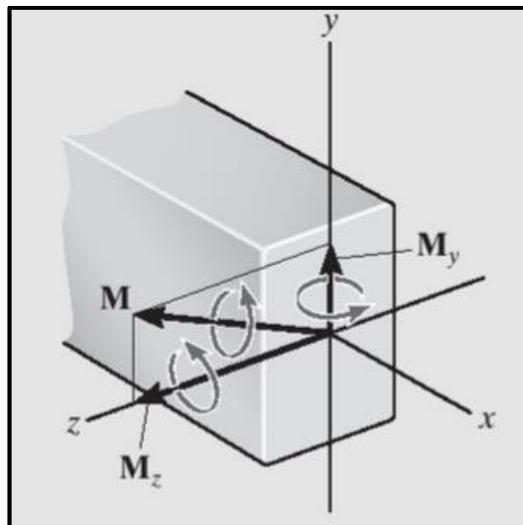
Se a seção transversal da viga não for simétrica em torno do eixo neutro, ocorrerá uma flexão assimétrica. Nesse caso a tensão máxima pode ser determinada por fórmulas, ou considerando a superposição da flexão em torno de dois eixos separados, aplicando-se a equação 5 (NORTON, 2004).

$$\sigma = -\frac{M_{zy}}{I_z} + \frac{M_{yz}}{I_y} \quad (5)$$

Nesta equação, σ é a tensão normal no ponto [MPa]; y e z são coordenadas do ponto medidas em relação aos eixos x , y , z com origem no centroide da área da seção transversal [m]; M_y e M_z são componentes do momento interno resultante direcionadas ao longo dos eixos principais y e z [N.m]; e I_y e I_z referem-se aos momentos principais de inércia calculados em torno dos eixos y e z [m⁴].

Com a análise da figura 10, é possível compreender melhor a equação 5 de flexão assimétrica.

Figura 10 – Flexão assimétrica



Fonte: Hibbeler (2010)

2.5.4 Torção

Quando elementos são solicitados ao longo do seu eixo longitudinal por um momento, diz-se que estão sob torção, e o momento aplicado é denominado torque ou momento torçor. Tal situação é comum em eixos que transmitem potência, e em qualquer situação em que o vetor do momento aplicado seja paralelo ao eixo longitudinal de um corpo (NORTON, 2004).

Segundo Hibbeler (2010), a tensão é de cisalhamento puro e pode variar de zero no centro até um máximo no raio externo, conforme mostra a figura 11.

$$\tau = \frac{T\rho}{J} \quad (6)$$

Nesta equação, τ é a tensão de cisalhamento puro [MPa]; T é o torque aplicado [N.m]; ρ se refere ao raio até qualquer ponto [m]; e J é o momento polar de inércia da seção transversal [m⁴].

O giro angular devido ao torque aplicado pode ser definido pela equação 7.

$$\theta = \frac{Tl}{JG} \quad (7)$$

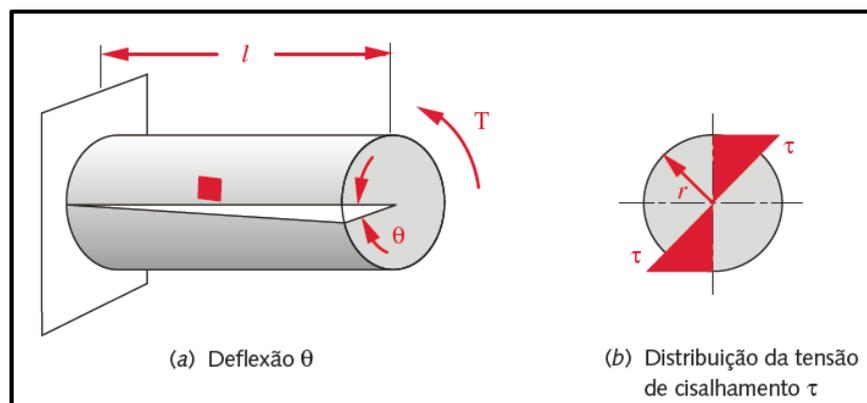
Onde, θ é o giro angular [rad]; l refere-se ao comprimento da barra [m]; G é o módulo de elasticidade transversal do material [GPa].

As equações 6 e 7 se aplicam somente para seções transversais circulares. O momento polar de inércia de uma seção transversal circular maciça de diâmetro d é dado pela seguinte equação.

$$J = \frac{\pi d^4}{32} \quad (8)$$

Norton (2004) afirma que a seção transversal circular é o formato ótimo para qualquer barra sujeita a carregamento torcional, e sempre que possível deve ser usada em todas as situações que envolvam torção.

Figura 11 – Eixo maciço submetido a um torque



Fonte: Norton (2004)

Segundo Hibbeler (2010), eixos e tubos de seção transversal circulares são frequentemente usados para transmitir potência desenvolvida por uma máquina. Quando usados nessas situações, estão sujeitos a torques que dependem da potência gerada pela máquina e da velocidade angular do eixo, de acordo com a equação 9.

$$Pe = T\omega \quad (9)$$

Nesta equação, Pe é a potência [N.m/s]; e ω é a velocidade angular do eixo [rad/s].

3 MATERIAIS E MÉTODOS

Atualmente, a empresa Brimaq Britadores e Máquinas fabrica britadores fixos e móveis sobre carretas. Através do desenvolvimento do mecanismo proposto nesse trabalho pretende-se ampliar essa linha de produtos, passando a fornecer também o triturador acoplado a uma escavadeira hidráulica. Com a implementação dessa nova linha, pretende-se entregar ao mercado um produto semelhante aos britadores fixos, com as mesmas finalidades, porém mais versátil em função da facilidade de transporte e instalação nos locais de serviço.

Nesse capítulo serão apresentados os procedimentos necessários para a realização desse trabalho.

3.1 OBJETO DE ESTUDO

O objeto de estudo desse trabalho foi dividido em duas etapas. Primeiramente foi feita uma análise dos três mecanismos dos britadores citados no Capítulo 2, afim de selecionar o que melhor atende os requisitos de projeto. Com a conclusão dessa análise e com o tipo de mecanismo selecionado, iniciou-se a segunda etapa, aonde de fato o mecanismo triturador acoplado a uma escavadeira hidráulica foi dimensionado.

3.2 PROPOSTA DE IMPLEMENTAÇÃO

O intuito dessa seção é detalhar os passos necessários para que no final todos os objetivos específicos sejam alcançados e o mecanismo triturador acoplado a escavadeira hidráulica seja dimensionado da melhor maneira.

3.2.1 Método

Através dos requisitos de projeto, apresentados no Quadro 1, foi tomada a decisão de qual mecanismo de britadores já existentes no mercado atende melhor as necessidades do projeto proposto. Foram avaliados criteriosamente pontos críticos que determinam o bom funcionamento e a eficiência do equipamento, como capacidade de produção, consumo de energia e resistência ao desgaste por abrasão.

É importante compreender que o mecanismo escolhido entre os revisados no Capítulo 2 é de um britador fixo que já existe no mercado há anos. A partir desse mecanismo já existente, realizou-se o dimensionamento do equipamento, com o objetivo de obter-se um mecanismo acoplado a uma escavadeira hidráulica, com a mesma função dos britadores tradicionais, porém com maior mobilidade.

Após o mecanismo ideal ser selecionado foram utilizados métodos analíticos para a avaliação de elementos críticos do equipamento. Foi realizado um dimensionamento robusto, capaz de suportar as cargas que normalmente os trituradores de minerais e rochas são submetidos. Normalmente o eixo principal e os rolamentos são pontos críticos na maioria dos britadores, ambos se mal dimensionados apresentam vida útil extremamente baixa e custos para substituição elevados.

Os esforços que agem sobre o eixo principal e os rolamentos, foram determinados em função da força necessária para fragmentar o material ao longo da câmara de britagem. Utilizou-se uma rocha com a resistência a compressão elevada, para realizar um dimensionamento levando em consideração condições extremas. A abanadeira, apesar de não ter elevado custo para sua substituição, também é considerado um elemento crítico. A mesma se mal dimensionada, pode falhar durante a operação normal e causar paradas inesperadas no equipamento.

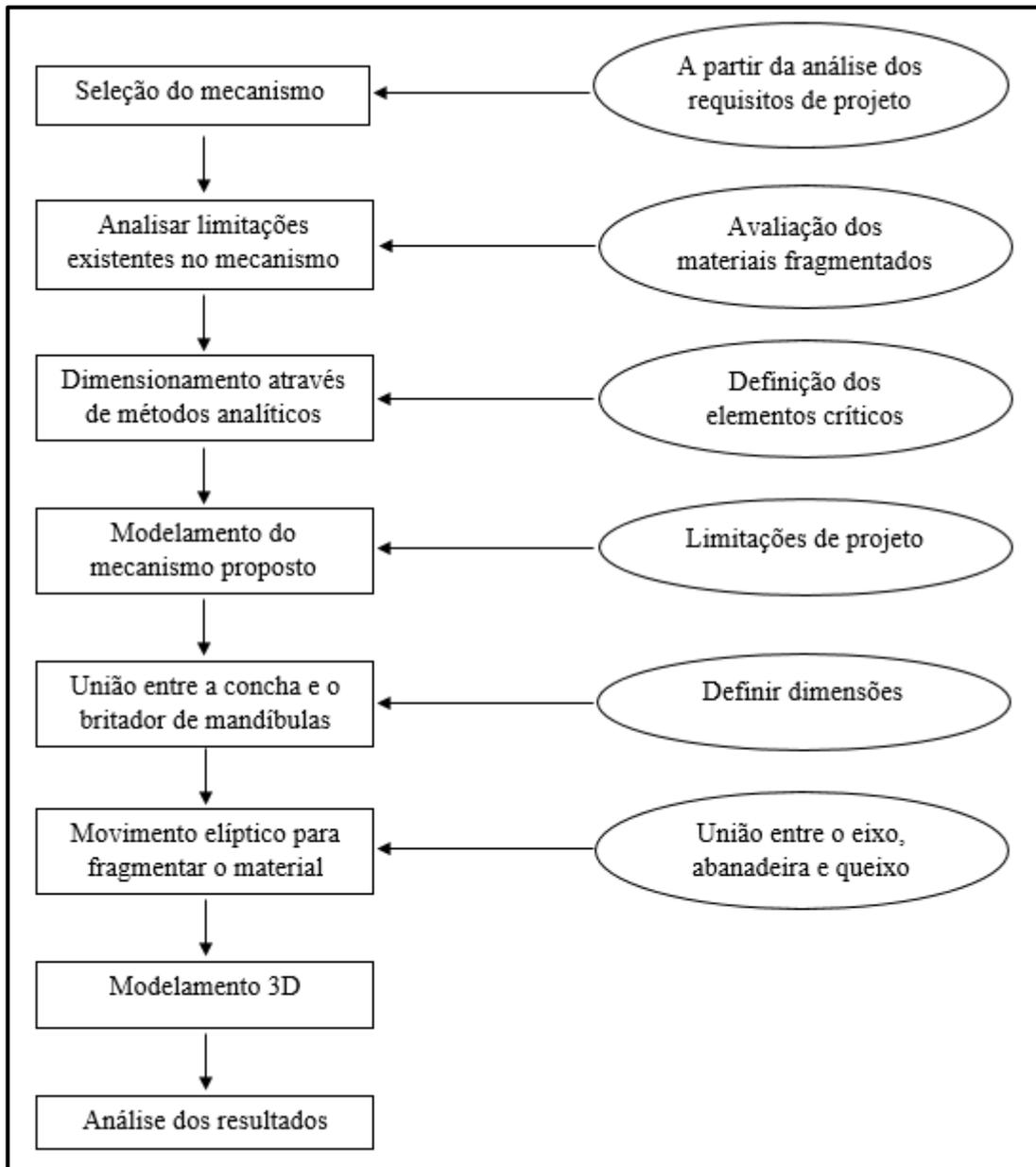
O modelamento da caçamba trituradora foi realizado em um *software* de CAD 3D, onde o mecanismo completo foi dimensionado. Nessa etapa, pontos de suma importância foram avaliados criteriosamente, para garantir a perfeita união entre o britador tradicional e a concha da escavadeira.

3.2.2 Fluxograma das atividades

O fluxograma das atividades (Figura 12), mostra de forma resumida os passos para que o trabalho ocorra da melhor maneira. Cada uma das etapas apresentadas é de suma importância para o bom desenvolvimento do trabalho. Desde a definição do mecanismo, até o modelamento 3D, uma etapa depende da outra, e por isso foi seguido essa lógica do fluxograma, demonstrando assim como o objetivo final foi alcançado.

A etapa de dimensionamento analítico foi a que demandou maior atenção, pois a partir dela que o mecanismo triturador acoplado a escavadeira hidráulica pode de fato ser dimensionado.

Figura 12 – Fluxograma de atividades



Fonte: O autor (2019)

3.3 REQUISITOS DE PROJETO

Os requisitos de projeto são necessários para o bom desenvolvimento do trabalho. A partir das necessidades dos clientes, os requisitos de projetos são desenvolvidos e mensurados, para que o projeto tenha um caminho a ser seguido e no final supra todas as necessidades dos clientes. O Quadro 1 lista os principais requisitos de projetos para o desenvolvimento do mecanismo acoplado a uma escavadeira hidráulica.

Quadro 1 – Requisitos de projeto

Requisitos de Projeto	Valor Meta
Dimensões máximas do equipamento	1 m ³
Proteções para assegurar a segurança do operador (NR 12)	Classe 4
Vida dos rolamentos do mecanismo	8.000 h
Capacidade de produção	16 tonelada/h
Quantidade de operadores	1
Custo de energia por tonelada produzida	0,30 R\$/tonelada
Custo de produção	R\$ 30.000,00
Baixo custo de manutenção	400 R\$/mês
Tempo de manutenção	10 min/dia
Regime de operação	40 h/semana
Vida do equipamento (depreciação)	10 anos
Substituição das peças de desgaste	6 meses
Tamanho de saída do material triturado	19 mm
Tamanho de entrada do material a ser triturado	300 mm

Fonte: O autor (2018)

3.4 DEFINIÇÃO DO MECANISMO

Através de uma análise criteriosa dos três britadores revisados no Capítulo 2 e avaliando os requisitos de projetos, a caçamba trituradora será dimensionada através do mecanismo dos britadores de mandíbulas.

A seguir serão listados os principais pontos analisados:

- a) Capacidade de produção: realizando uma comparação entre os britadores de mandíbulas, os britadores de impacto horizontal e os britadores de rolos dentados, chegou-se à conclusão que o que apresenta maior eficiência entre a capacidade de produção e o custo com energia é o britador de rolos dentados, com um custo de 0,14 R\$/tonelada produzida, contra 0,26 R\$/tonelada do britador de mandíbulas, porém mesmo o britador de mandíbulas tendo um custo mais alto de energia, ainda está dentro dos requisitos de projeto, e nos tópicos seguintes sua escolha será justificada;

- b) Características dos materiais que podem ser triturados: os britadores de rolos dentados podem trabalhar com materiais de média e baixa dureza, pois senão os dentes apresentam quebra e desgaste prematuro. Já os britadores de impacto horizontal não devem trabalhar com material com alto índice de abrasividade, pois as peças de reposição desgastam rápido e o custo de manutenção torna-se alto. Quando deseja-se fragmentar materiais de elevadas durezas e dimensões a melhor opção é o britador de mandíbulas;
- c) Razão de redução do material: o britador que apresenta a maior razão de redução é o de impacto horizontal, em torno de até 40:1, mas com a realização de um projeto bem dimensionado o britador de mandíbulas também pode apresentar uma boa razão de redução, em torno de 10:1;
- d) Custo de manutenção: o britador de mandíbulas trabalha com o mecanismo de compressão e cisalhamento para fragmentar o material, e opera com rotação do eixo baixa, em torno de 300 rpm, em comparação a um britador de impacto horizontal, que tritura o material por impacto e trabalha com rotação em torno de 1700 rpm. Essas diferenças dos mecanismo faz com que o britador de mandíbulas apresente uma durabilidade maior das suas peças de reposição.

4 RESULTADOS

4.1 DIMENSIONAMENTO ANALÍTICO DOS ELEMENTOS CRÍTICOS

Nessa seção foram analisados três elementos críticos que compõe o equipamento, cada um com as suas especificidades e funções. O estudo começou pelo eixo excêntrico, em seguida foi analisado a vida dos rolamentos e por último a abanadeira.

4.1.1 Eixo excêntrico

Para realizar uma análise dos esforços sobre o eixo excêntrico, primeiramente é necessário verificar as forças que atuam diretamente no queixo do equipamento. O eixo é um elemento que com frequência apresenta falha. Essas falhas normalmente acontecem quando um material não britável, por exemplo ferro, entra na câmara de britagem e a mandíbula móvel apoiada no queixo e ligada ao eixo tentam triturar esse material.

A força necessária para fragmentar o material ao longo da câmara de britagem está ligada aos esforços que o eixo sofre. O queixo trabalha com a parte excêntrica do eixo, enquanto a parte concêntrica do eixo está apoiada em mancais na carcaça do equipamento. Através de uma análise de momentos, é possível encontrar a força que está agindo sobre o eixo enquanto o queixo e a mandíbula estão triturando o material.

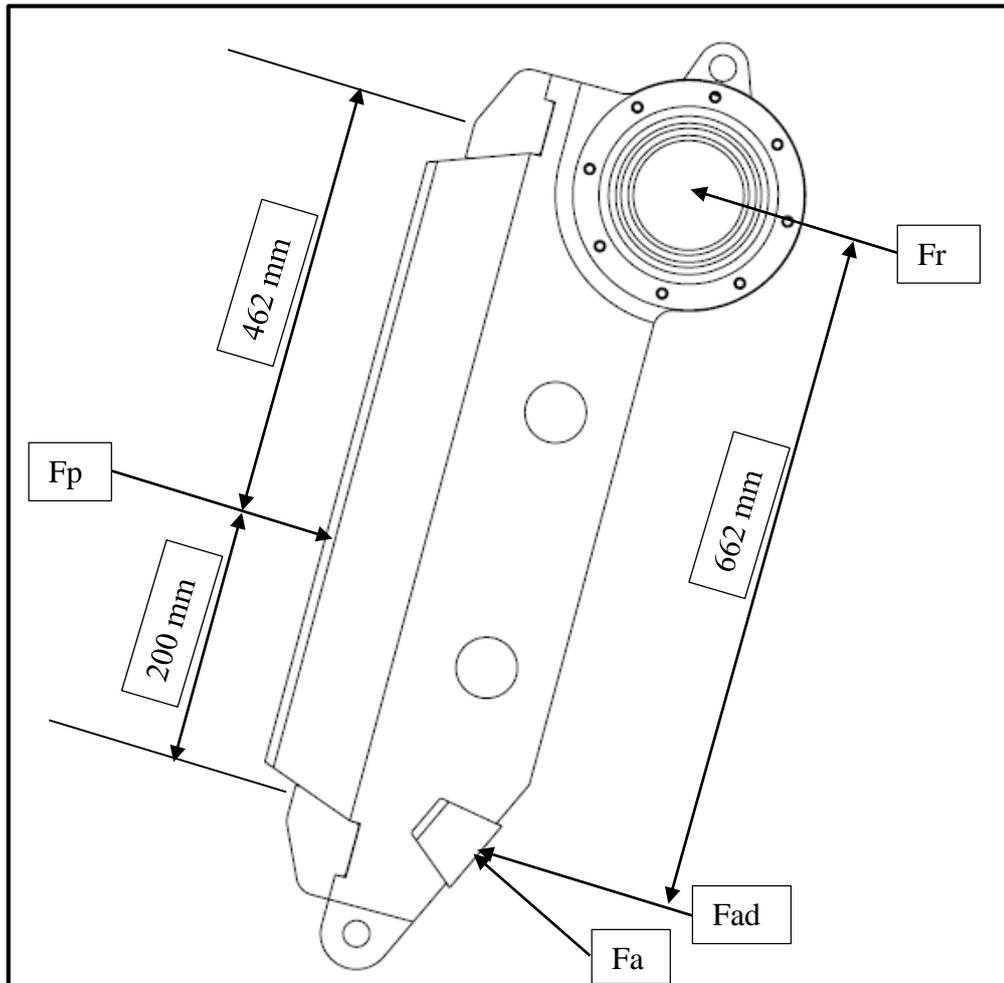
Para essa análise foi idealizado um mineral que passa pelo processo de fragmentação, com sua resistência a compressão e área determinados, com isso é possível determinar a força que o queixo realiza em um determinado ponto para quebrar esse material. Com essa força e considerando que o queixo é apoiado na abanadeira, é possível com a análise de momentos definir o esforço atuante no eixo.

Utilizando a resistência a compressão do Quartzito, o material que foi revisado que apresenta a maior resistência, podendo chegar aos 627 MPa, e a área de contato da superfície desse material com a mandíbula, que no ponto em que foi analisado possui um valor de 985 mm².

$$\sigma = \frac{F_p}{A} \quad (10)$$

Com o auxílio da Equação 10, é possível encontrar o valor da força necessária para romper o material na câmara de britagem (F_p). Substituindo os valores de tensão e de área encontra-se que $F_p = 617,60 \text{ kN}$.

Figura 13 – Diagrama de corpo livre do queixo



Fonte: O autor (2019)

Por meio de um equilíbrio de forças no diagrama da Figura 13, tendo o valor de F_p , é possível calcular as outras duas forças que atuam perpendicularmente ao queixo. A abanadeira realiza uma força decomposta (F_{ad}) perpendicular ao queixo. A partir dos esforços analisados no queixo, chega-se na força (F_r) que atua diretamente sobre os dois rolamentos que trabalham na parte excêntrica do eixo.

A partir do equilíbrio de forças é possível determinar os valores de F_{ad} e de F_r , que valem respectivamente $431,00 \text{ kN}$ e $186,60 \text{ kN}$. Considerando que o ângulo entre F_a e F_{ad} é 30° , realizando a decomposição chega-se no valor de $F_a = 497,68 \text{ kN}$.

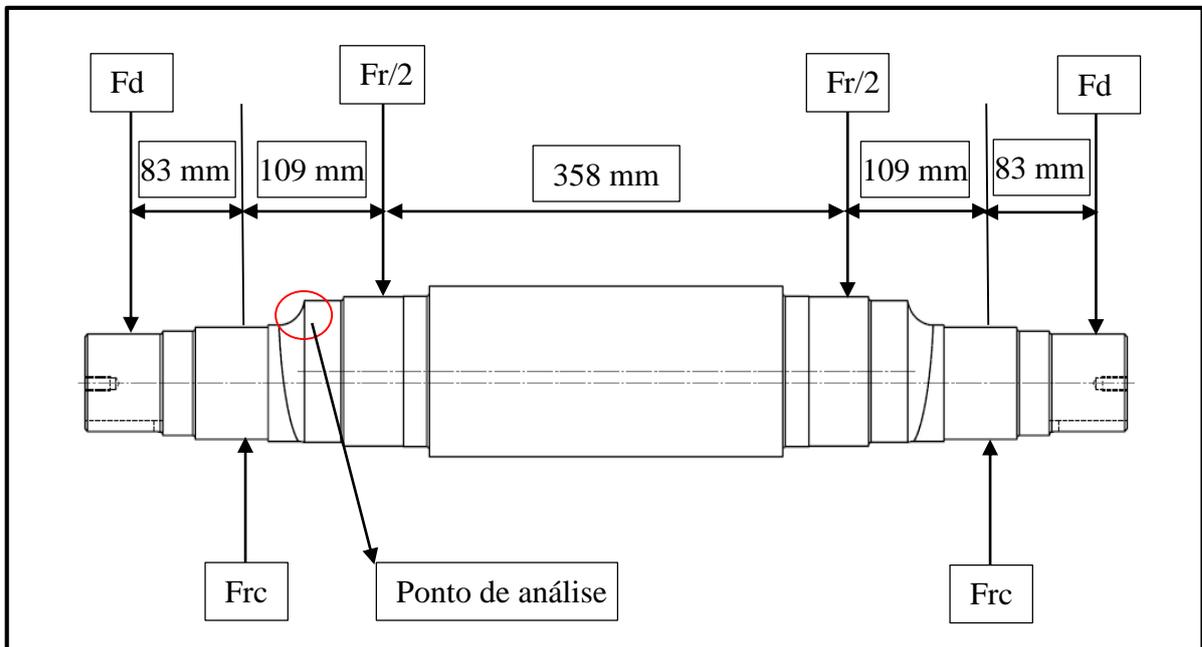
Concluindo essa etapa de análise de esforços no queixo, encontrou-se F_r . Lembrando-se que o foco é analisar o eixo excêntrico, para isso foi calculada a força que atua no eixo em função do queixo. Para a análise no eixo ficar completa, ainda é necessário definir a força que cada volante através de uma massa desbalanceada na extremidade do raio realiza sobre o eixo.

Em cada extremidade do eixo tem um volante, cada um desses volantes conta com uma massa desbalanceada de 20 kg, distantes 0,20 m do centro do eixo e girando com uma velocidade angular de $35\pi/3$ rad/s. Sendo assim pode-se definir a força desbalanceadora (F_d) a partir da Equação 11.

$$F_d = m \cdot \omega^2 \cdot r \quad (11)$$

Substituindo os valores supramencionados encontra-se que $F_d = 5,37$ kN. Com os valores das forças que atuam sobre o eixo definidas, a seguir será feito um diagrama de corpo livre do eixo excêntrico.

Figura 14 – Diagrama de corpo livre do eixo excêntrico

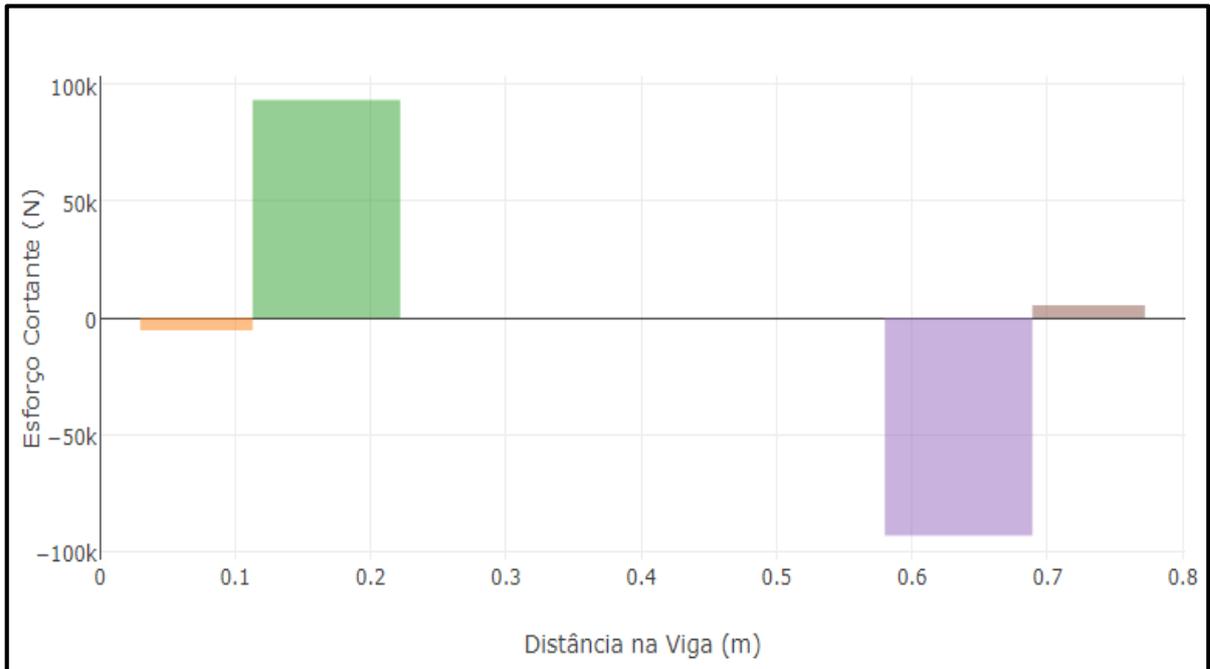


Fonte: O autor (2019)

Como os valores de F_d e F_r já foram calculados anteriormente, a partir de um equilíbrio de forças é possível determinar que as reações que atuam nos rolamentos da carcaça (F_{rc}) é igual a 98,67 kN.

A partir dos resultados obtidos na análise de esforços atuantes sobre o eixo excêntrico, foram gerados gráficos de força cortante e momento fletor. Ambos foram utilizados para poder melhor compreender a forma com que as cargas atuam no eixo.

Figura 15 – Gráfico esforço cortante do eixo excêntrico



Fonte: O autor (2019)

Figura 16 – Gráfico momento fletor do eixo excêntrico



Fonte: O autor (2019)

O gráfico de esforço cortante no eixo, representado pela Figura 15, demonstra que o local com maior pico de esforço é justamente aonde se tem um raio, o qual divide a parte excêntrica da parte concêntrica do eixo. Em função disso normalmente o eixo falha por quebra nesse raio, sendo assim, esse foi o ponto de análise.

A posição destacada no gráfico de momento fletor no eixo, Figura 16, representa o valor do momento que atua no raio que está sendo analisado. Conforme pode ser observado no gráfico de momento fletor, o maior momento não ocorre no raio em que normalmente falha, mas isso pode ser justificado em função de que no ponto de maior momento o diâmetro também é maior e não apresenta nenhum concentrador de tensão.

Para calcular o coeficiente de segurança do eixo excêntrico no ponto de análise é necessário conhecer os seguintes valores: momento (M) que atua segundo o gráfico da Figura 16 que é igual a 3560,54 kN.mm; diâmetro (d) 78 mm; tensão de escoamento do material (Sy) 415 MPa; e o torque (T) que a partir da potência de acionamento de 20 cv e velocidade de rotação de 350 rpm chegou-se no valor de 401,34 kN.mm. Segundo Shigley et al. (2005), esse cálculo pode ser realizado a partir da Equação 12.

$$d = \sqrt[3]{\frac{4 \cdot n}{\pi \cdot S_y} \cdot [\sqrt{(8 \cdot M)^2 + (48 \cdot T^2)}]} \quad (12)$$

Substituindo os valores na equação, o coeficiente de segurança (n) resultou em um valor de 5,40. Esse valor apresenta um índice de incerteza nos cálculos, pois esse resultado depende da suposição do material que foi idealizado que passa pelo processo de fragmentação. Demonstra que se o eixo excêntrico operar somente com o material adequado na câmara de britagem, a falha por tensão não ocorrerá. Pode ocorrer a falha se um material não-britável adentrar na câmara de britagem e ultrapassar a resistência do eixo excêntrico, assim fraturando o mesmo no raio de análise.

4.1.2 Vida dos Rolamentos

A caçamba trituradora opera com quatro rolamentos autocompensadores de rolos no eixo, dois desses com a referência 22220 trabalham dentro do tubo do queixo e os outros dois com a referência 22315 são fixos através de mancais na carcaça do equipamento.

A carga que atua sobre o rolamento 22220 é a Fr/2 e no rolamento 22315 é a Frc, conforme a Figura 14. Segundo Timken (2011), a capacidade de carga dinâmica (C) do

rolamento do queixo é de 435 kN e do rolamento da carcaça é de 450 kN. Para rolamentos autocompensadores de rolos é utilizado um fator $K=3,33$ no cálculo de vida dos mesmos.

$$L = \left(\frac{C}{CA} \right)^K \quad (13)$$

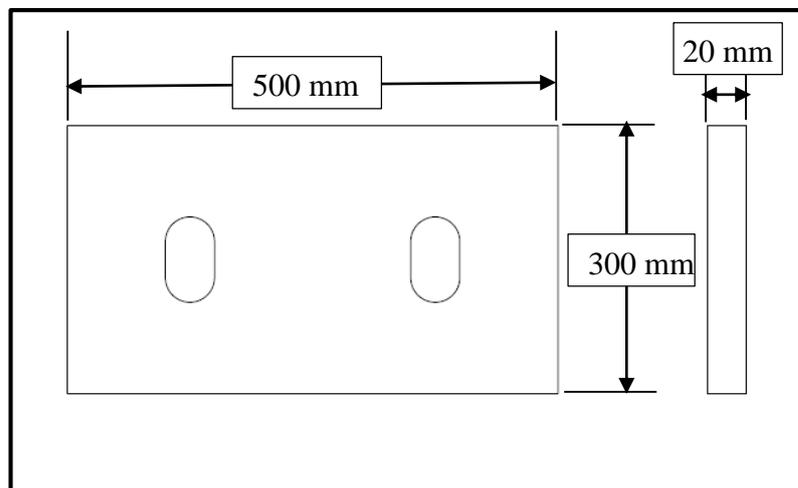
Substituindo os valores supramencionados na Equação 13, chegou-se aos seguintes resultados: para o rolamento 22220 a vida nominal (L) é igual a $168,51 \times 10^6$ ciclos, o equivalente a aproximadamente 9360 horas; para o rolamento 22315, $L = 156,57 \times 10^6$ ciclos, que transformado em horas é aproximadamente 8700 horas.

Esse cálculo de vida de rolamentos, é baseado em uma análise estatística, podendo ocorrer variações para mais ou para menos. Essas variações podem ocorrer, pois os rolamentos são extremamente sensíveis, não devem ficar expostos diretamente ao tempo, na chuva e na poeira. Realizando a manutenção e utilizando o lubrificante adequado, a tendência é os rolamentos apresentarem uma vida igual ou maior a vida nominal.

4.1.3 Abanadeira

Nesse elemento foram avaliadas a deformação elástica e a carga crítica de flambagem. No momento em que o material está sendo triturado na câmara de britagem, a carga que atua sobre a abanadeira é Fa , conforme pode ser visualizado na Figura 13. Durante a sua operação, a abanadeira está sujeita a compressão.

Figura 17 – Dimensões da abanadeira



Fonte: O autor (2019)

Para a análise da deformação elástica é necessário definir os seguintes valores: carga aplicada, $F_a = 497,68$ kN; módulo de elasticidade, $E = 200$ GPa; comprimento, $l = 300$ mm; e a área da seção transversal, $A = 10000$ mm².

Utilizando a Equação 14, conforme Hibbeler (2010), é possível determinar a deformação elástica que a abanadeira está sujeita durante a operação de britagem.

$$\delta = \frac{F_a \cdot l}{A \cdot E} \quad (14)$$

Substituindo os valores na equação, encontra-se $\delta = - 0,075$ mm. Esse resultado apresentou um valor relativamente baixo, então a abanadeira não falhará por deformação no momento em que estiver em operação. Poderá ocorrer a falha somente se uma material não britável passar pela câmara de britagem.

A avaliação da carga crítica deve ser feita para garantir que a abanadeira não falhará por flambagem. Segundo Hibbeler (2010), a carga crítica de flambagem pode ser definida pela Equação 15. O momento de inércia da seção é $I = 333333,33$ mm⁴.

$$P_{cr} = \frac{\pi^2 \cdot E \cdot I}{l^2} \quad (15)$$

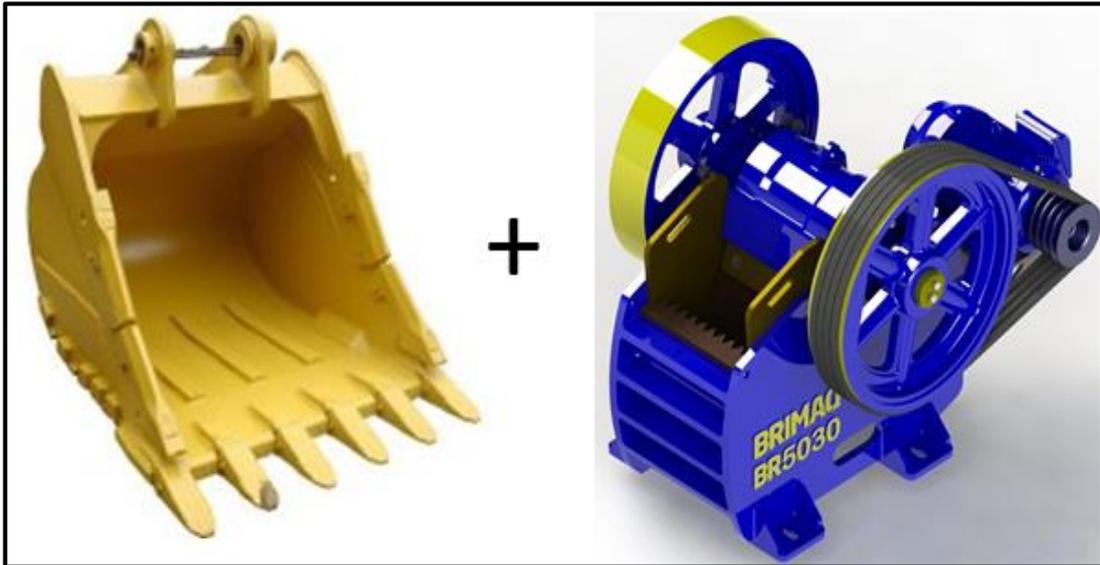
Realizando a substituição dos valores na Equação 15, é possível determinar que o valor da carga crítica de flambagem é $P_{cr} = 7310,82$ kN. Esse valor é relativamente alto, em comparação com a carga F_a que atua normalmente sobre a abanadeira. Pode-se afirmar então que, em condições normais de operação, a abanadeira não irá falhar por flambagem.

4.2 ETAPAS DO PROJETO

Nessa seção serão apresentadas as principais etapas para o desenvolvimento da caçamba trituradora. A ideia desse mecanismo parte de um conceito inovador, unindo a concha de uma escavadeira convencional com um britador de mandíbulas.

A união da concha de uma escavadeira convencional e do britador de mandíbulas, conforme a Figura 18, irá resultar no objetivo principal desse trabalho. Esse objetivo será atingido através do dimensionamento da caçamba trituradora, respeitando alguns pontos críticos tanto da concha, quanto do britador de mandíbulas.

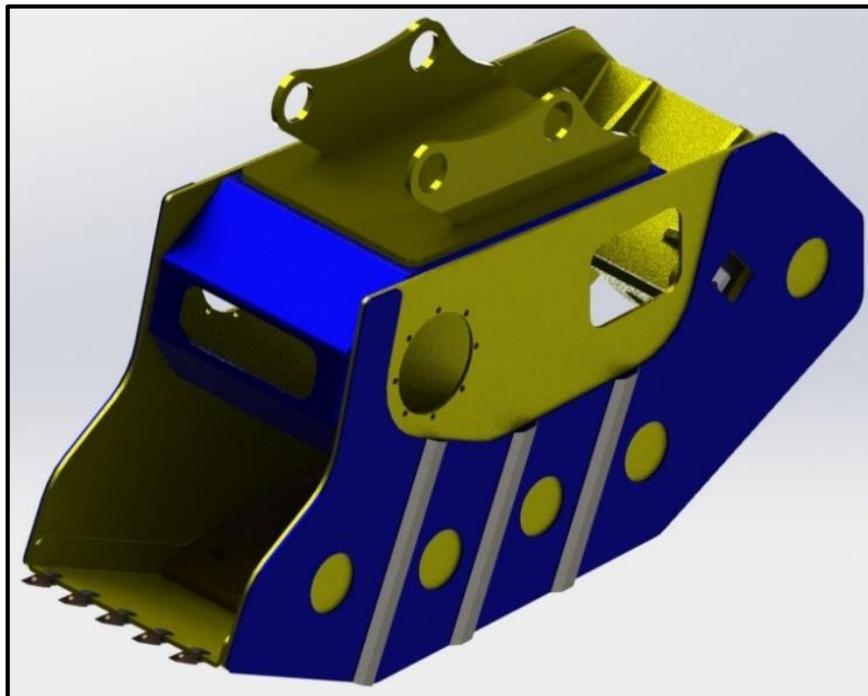
Figura 18 – Concha escavadeira e britador de mandíbulas



Fonte: O autor (2019)

A seguir serão apresentados brevemente, os elementos principais que compõe a caçamba trituradora e as suas funções na mesma.

Figura 19 – Carcaça da caçamba trituradora



Fonte: O autor (2019)

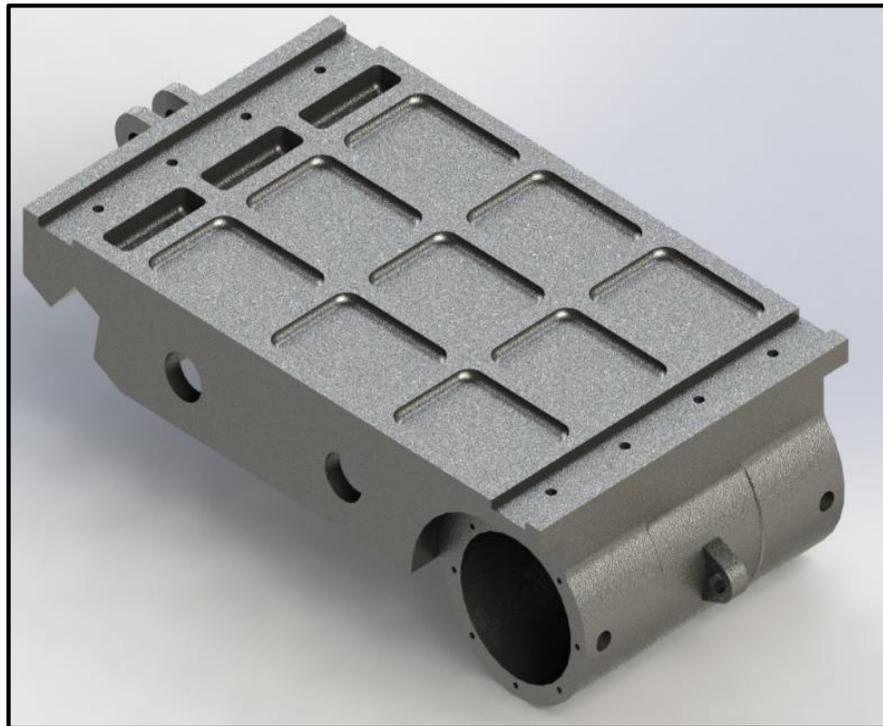
A carcaça representada na Figura 19, é responsável por fixar através de mancais e parafusos o queixo. Nela está contida a mandíbula fixa, que é uma peça de reposição fundida

em aço Hadfield, no processo de britagem o material está em contato direto com a mandíbula e por isso essa peça sofre com o desgaste e tem que ser substituída em determinados intervalos de tempo.

A estrutura da carcaça foi projetada em aço SAE 1020, mas em pontos externos aonde sofre desgaste elevado foi revestido com chapas de dureza mais elevada, justamente para evitar a falha prematura por desgaste das peças.

O ponto que exigiu maior atenção no dimensionamento da carcaça da caçamba foi o ângulo da base, aonde o material é coletado para dentro da concha, em relação ao suporte que fixa a caçamba no braço da escavadeira. Esse ângulo é de suma importância para garantir que o material a ser triturado seja coletado com eficiência, e por isso foi mantido o mesmo das conchas de escavadeiras tradicionais.

Figura 20 – Queixo da caçamba trituradora



Fonte: O autor (2019)

O queixo, Figura 20, serve de apoio para a mandíbula móvel que não está representada na figura, mas que é fabricada no mesmo material que a mandíbula fixa descrita anteriormente. Em conjunto as mandíbulas fixa e móvel formam a câmara de britagem que tem por objetivo fragmentar o material processado.

No tubo do queixo, o eixo excêntrico é posicionado com o auxílio de rolamentos auto compensadores de rolos. Esse conjunto, composto pelo queixo, eixo excêntrico e mandíbula

móvel, realizam juntos um movimento elíptico que é capaz de triturar o material ao longo da câmara de britagem. Em suma o importante é compreender que a carcaça do equipamento durante a operação de fragmentação fica estática, e o queixo realiza o movimento elíptico.

Fundido inteiro em aço SAE 1020, como é o padrão dos britadores de mandíbulas tradicionais, o queixo garante durabilidade e menores chances de falha. Existe a possibilidade de fabricar esse item com chapas em aço SAE 1020, montando-o com o processo de soldagem, porém essa hipótese foi descartada, pois as tensões geradas pela solda são altas e comprometem a estrutura do mesmo. Nesse caso o processo de fundição é mais eficiente e por isso o mesmo foi utilizado, apesar de ter um custo inicial mais elevado.

Figura 21 – Eixo excêntrico da caçamba trituradora



Fonte: O autor (2019)

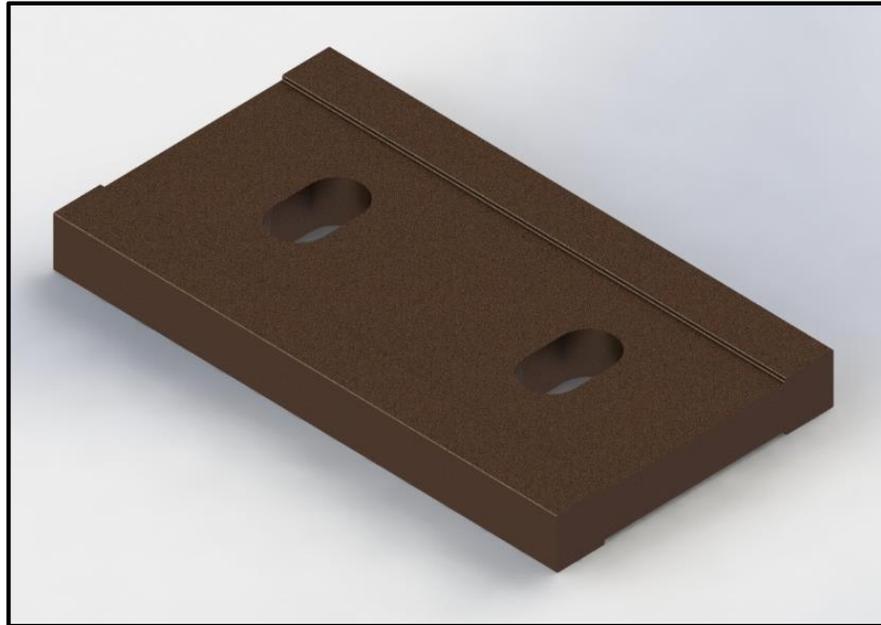
O eixo excêntrico, representado pela Figura 21, é um elemento fundamental para o bom funcionamento do equipamento. A sua excentricidade está diretamente ligada a capacidade de produção da caçamba trituradora. O excêntrico do eixo em conjunto com o queixo e a abanadeira, garantem o movimento elíptico necessário para realizar a fragmentação do material na câmara de britagem.

Pode-se afirmar que esse é o elemento mais crítico do mecanismo, pois um grande número de falhas nos britadores tradicionais estão relacionadas com quebras no eixo excêntrico. Essas falhas não ocorrem por fadiga, mas sim quando materiais não britáveis, como ferro ou

madeira, entram na câmara de britagem e extrapolam os limites de resistência do eixo, quebrando-o no raio que divide a parte concêntrica da parte excêntrica.

O material em que os eixos são fabricados são os aços SAE 4140 ou SAE 4340, seguindo o padrão dos britadores tradicionais, normalmente laminados ou forjados.

Figura 22 – Abanadeira da caçamba trituradora



Fonte: O autor (2019)

A abanadeira, Figura 22, é responsável em conjunto com o eixo excêntrico e o queixo, de realizar o movimento elíptico necessário para fragmentar o material ao longo da câmara de britagem. Normalmente esse elemento é fabricado em aço SAE 1020.

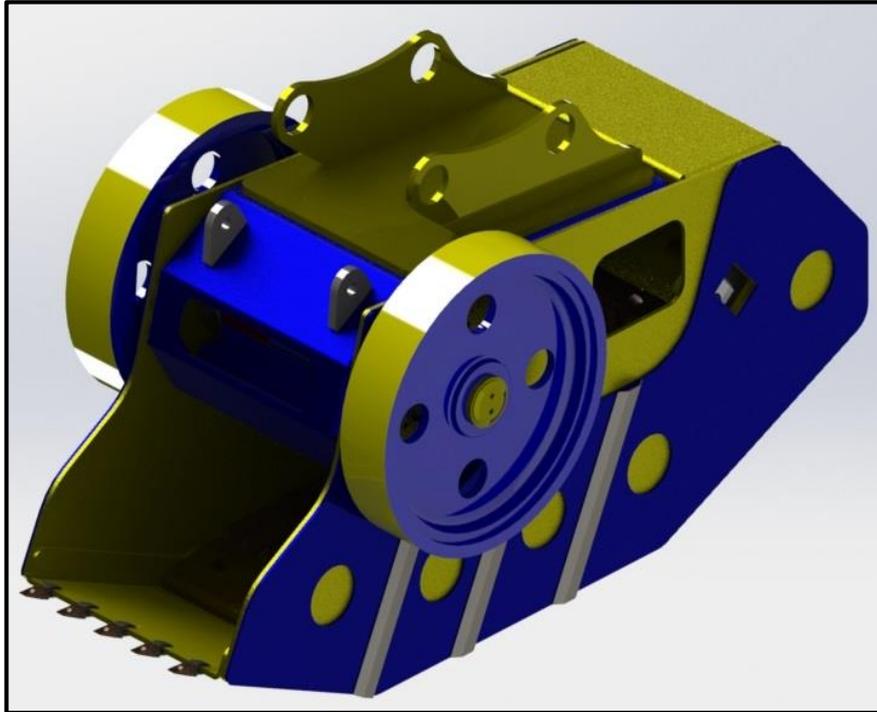
No projeto da abanadeira deve-se avaliar criteriosamente os esforços que atuam sobre a mesma. Se o dimensionamento for realizado de forma incorreta, e a abanadeira não suportar as cargas que atuam sobre ela no momento da trituração do material, ocorrerá a falha.

Unindo os elementos demonstrados nessa seção, chega-se no projeto final da caçamba trituradora, conforme a Figura 23. Primeiramente o eixo excêntrico é montado dentro do tubo do queixo com dois rolamentos auto compensadores de rolos, na sequência o queixo é fixado na carcaça da caçamba trituradora através de parafusos e mais dois rolamentos auto compensadores de rolos.

Dessa forma chegou-se no mecanismo compacto capaz de triturar o material ao longo da câmara de britagem. A caçamba trituradora é fixada ao braço da escavadeira hidráulica através de um suporte com pinos. O movimento para coletar o material é realizado da mesma maneira que com a concha tradicional. No momento em que o material a ser triturado já está na

câmara de britagem, os volantes são acionados através de correias em V. A partir desse acionamento o queixo em conjunto com o eixo excêntrico realizam o movimento elíptico necessário para fragmentar o material.

Figura 23 – Caçamba trituradora



Fonte: O autor (2019)

5 CONCLUSÃO

Esse trabalho encerra-se após alcançar o objetivo geral definido, o dimensionamento do mecanismo de uma caçamba trituradora acoplada a uma escavadeira hidráulica. Assim chegou-se no resultado da união de um britador de mandíbulas tradicional com uma concha de uma escavadeira. Essa união garante produtividade e mobilidade do equipamento.

Para tanto, foram desenvolvidos estudos conceituais dos mecanismos dos britadores tradicionais, e do movimento que o mecanismo necessita realizar para triturar o material. A partir da definição do mecanismo do britador de mandíbulas, foi analisado que para fragmentar o material é necessário um movimento elíptico, realizado em conjunto pelo eixo excêntrico, o queixo e a abanadeira.

A partir dos requisitos de projetos o mecanismo ideal foi selecionado. Dentre os mecanismos analisados, o do britador de mandíbulas apresentou mais pontos fortes. O mesmo pode triturar materiais com elevada dureza e altos índices de abrasão, possui alta capacidade de produção, baixo custo e facilidade de manutenção.

Na sequência, de fato a caçamba trituradora foi modelada em um *software* de CAD 3D. As dimensões da concha da escavadeira necessitaram de alguns ajustes, para que se tornasse possível fixar o queixo do britador de mandíbulas dentro da caçamba. Nessa etapa um ponto de suma importância necessitou ser avaliado, que é o posicionamento do queixo em conjunto com a abanadeira, isso que garantirá o movimento elíptico para triturar o material.

O dimensionamento analítico dos pontos críticos, demonstrou que os elementos foram bem projetados. Por exemplo, o eixo excêntrico apresentou um coeficiente de segurança estático igual a 5,40, e a vida dos rolamentos está dentro do esperado pelos requisitos de projeto. Em suma o equipamento apresentará boa produção, mobilidade e elementos críticos dimensionados de forma adequada.

6 TRABALHOS FUTUROS

Conforme as conclusões apresentadas e para a continuidade dos estudos desenvolvidos nessa linha de pesquisa, sugere-se o estudo dos esforços que a carcaça da caçamba sofre durante a operação de fragmentação. Essa avaliação é interessante, pois, a partir dela o custo para fabricação do equipamento pode ser possivelmente reduzido e a carcaça pode ser projetada de uma maneira mais eficiente.

Ainda nessa linha de pesquisa, poderia ser realizado um trabalho específico sobre a abanadeira, esse elemento é considerado crítico no equipamento. Conforme projetada, a abanadeira funciona como um fusível da máquina, se um material não britável passar pela câmara de britagem, a mesma falhará evitando que outros elementos do equipamento falhem. Para isso deve ser feito um estudo detalhado da abanadeira, dos esforços que está sujeita e dos possíveis materiais não britáveis que podem passar pela câmara de britagem.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ANDRADE, Gustavo Tressia de. **Resistência a abrasão de Aço Hadfield para Britadores - efeito do tamanho abrasivo e do pH do meio**. 2015. 147 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Mecânica, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2015.

AZADI, Mahboobeh; PAZUKI, Ali Mirani; OLYA, Mohammad Javad. The Effect of New Double Solution Heat Treatment on the High Manganese Hadfield Steel Properties. **Metallography, Microstructure, And Analysis**, [s.l.], v. 7, n. 5, p.618-626, 10 ago. 2018. Springer Nature America.

BAL, Burak. A Study of Different Microstructural Effects on the Strain Hardening Behavior of Hadfield Steel. **International Journal Of Steel Structures**, [s.l.], v. 18, n. 1, p.13-23, mar. 2018. Springer Nature.

CARVALHO, Mariana Xavier Sans de. **Equipamentos de Fragmentação: Uma Revisão Avaliando Circuitos Alternativos para a Moagem de Finos**. 2012. 70 f. Monografia (Especialização) - Curso de Engenharia de Minas, Escola de Engenharia da Universidade Federal de Minas Gerais, Minas Gerais, 2012.

FIGUEIRA, Hedda Vargas O.; LUZ, Adão Benvindo da; ALMEIDA, Salvador Luiz Matos de. Britagem e Moagem. In: LUZ, Adão B. da; SAMPAIO, João Alves; FRANÇA, Silvia Cristina A.. **Tratamento de Minérios**. 5. ed. Rio de Janeiro: Cetem, 2010. Cap. 4. p. 143-211.

GALERY, R. *Fragmentação de Minérios: Primeira Parte*. Belo Horizonte: UFMG, 2011. 230 p.

GERONIMO. **Britadores**. São Paulo: Geronimo, 2008. 38 slides, color.

GRISON, Vagner. **PROJETO E DIMENSIONAMENTO DE EIXOS**. Caxias do Sul: Slides, 2017. 22 slides, color.

HIBBELER, Russell Charles. **Resistência dos Materiais**. 7. ed. São Paulo: Pearson Prentice Hall, 2010.

LENCINA, Rodrigo et al. Assessing Wear Performance of Two High-carbon Hadfield Steels Through Field Tests in the Mining Industry. **Procedia Materials Science**, [s.l.], v. 9, p.358-366, 2015. Elsevier BV.

LOPES, Thiago Oliveira. **BRITADORES E MOINHOS**. 2010. Curso de Química Industrial, Universidade Estadual de Goiás, Anápolis, 2010.

LUZ, Adão Benvindo da; SAMPAIO, João Alves; ALMEIDA, Salvador Luiz Matos de. **Tratamentos de Minérios**. 4. ed. Rio de Janeiro: Cetem/mct, 2004. 837 p.

MATWEB. **Material Property Data**. Disponível em: <<http://www.matweb.com/>>. Acesso em: 07 out. 2018.

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

NORTON, Robert L. **Projeto de máquinas**: uma abordagem integrada. 2. ed. Porto Alegre: Bookman, 2004.

PERONI, Rodrigo. **Geologia de Engenharia**. Porto Alegre: UFRGS, 2008. 129 p.

SCHROEDER, Renan Muller. **DESENVOLVIMENTO DE AÇO HADFIELD SINTERIZADO CONTENDO PARTÍCULAS DE GRAFITA NO VOLUME**. 2015. 132 f. Tese (Doutorado) - Curso de Engenharia de Materiais, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2015.

SHIGLEY, Joseph E.; MISCHKE, Charles R.; BUDYNAS, Richard G. **Projeto de Engenharia Mecânica**. 7. ed. Porto Alegre: Bookman, 2005.

TIMKEN. **Catálogo de rolamentos autocompensadores de rolos TIMKEN**. São Paulo: Timken, 2011.

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

VARELA, James J. et al. APLICAÇÃO DO TESTE DE CARGA PONTUAL MODIFICADO PARA SELEÇÃO DE BRITADORES PARA MINÉRIO DE FERRO. **Holos**, [s.l.], v. 7, p.19-26, 24 dez. 2015. Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Rio Grande do Norte (IFRN).

WILLS, Barry A.; NAPIER-MUNN, Tim. **Mineral Processing Technology: An Introduction to the Practical Aspects of Ore Treatment and Mineral**. 7. ed. Queensland: Elsevier Science & Technology Books, 2006.

ZHANG, G.S.; XING, J.D.; GAO, Y.M. Impact wear resistance of WC/Hadfield steel composite and its interfacial characteristics. *Wear*, p. 728 – 734, 2006.