

UNIVERSIDADE ESTADUAL DO MARANHÃO
CENTRO DE CIÊNCIAS TECNOLÓGICAS
CURSO DE ENGENHARIA MECÂNICA

ANTÔNIO VINICIUS GARCIA CAMPOS

**ESTUDO DE CASO EM LUBRIFICAÇÃO DE ENGRENAGENS DE
ACIONAMENTO DE MOINHOS DE MINERAÇÃO**

SÃO LUÍS

2015

ANTÔNIO VINICIUS GARCIA CAMPOS

**ESTUDO DE CASO EM LUBRIFICAÇÃO DE ENGRENAGENS DE
ACIONAMENTO DE MOINHOS DE MINERAÇÃO**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à
Universidade Estadual do Maranhão, como parte dos
requisitos necessários para a obtenção do grau de
Bacharel em Engenharia Mecânica.

Orientador: Prof. Msc. Flávio Nunes Pereira.

SÃO LUÍS

2015

Campos, Antônio Vinícius Garcia.

Estudo de caso em lubrificação de engrenagens de acionamento de moinhos de mineração / Antônio Vinícius Garcia Campos.–São Luís, 2015.

81f.

Monografia (Graduação) – Curso de Engenharia Mecânica, Universidade Estadual do Maranhão, 2015.

Orientador: Prof. Msc. Flávio Nunes Pereira.

1.Lubrificação. 2.Engrenagens. 3.Moinhos. 4.Engenharia. 5.Manutenção.
I.Título

CDU: 62-72

ANTÔNIO VINÍCIUS GARCIA CAMPOS

**ESTUDO DE CASO EM LUBRIFICAÇÃO DE ENGRENAGENS DE
ACIONAMENTO DE MOINHOS DE MINERAÇÃO.**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à
Universidade Estadual do Maranhão, como parte dos
requisitos necessários para a obtenção do grau de
Bacharel em Engenharia Mecânica.

Monografia Aprovada em: 07/12/2015

BANCA EXAMINADORA



Prof. Msc. Flávio Nunes Pereira (Orientador)

Universidade Estadual do Maranhão



Prof. Msc. Paulo Roberto Campos Fleza Ribeiro Filho

Universidade Estadual do Maranhão



Prof. Saulo José Agostini Oliveira

Universidade Estadual do Maranhão

Dedico este trabalho aos meus pais e a minha família, pelo apoio constante na educação e pelos ensinamentos de bons valores, que contribuíram para realização deste trabalho, sempre me apoiando e depositando fé para que eu realizasse meus sonhos.

AGRADECIMENTOS

Ao Nosso Senhor Deus, ao qual entrego minha fé e dedicação, pelo dom da vida e pela esperança de poder realizar mais conquistas e vitórias.

Aos meus pais Elisângela e Antônio, pelo apoio e confiança, ao amor e fé dedicada, por toda a boa educação e ensinamentos que me deram, e por der me mostrado como ser uma pessoa de bom coração e de valores. Ao meu irmão Adriano pelo amor fraternal e pela amizade, e a todos os meus familiares pelo apoio e fé depositada.

A todos os meus amigos, pelo apoio incondicional e pelo verdadeiro valor da amizade, da diversão e pelos bons momentos de gargalhadas. Aos amigos da Equipe Coyote do projeto eficiência energética, onde tive a oportunidade de aprender muito e me desenvolver, eu tenho muito orgulho de ter participado desta equipe e de ter depositado tanto esforço e dedicação.

A todos os meus mestres, professores e tutores, pelos ensinamentos e apoio aos estudos. Agradeço de coração aos meus professores do ensino fundamental até o ensino médio, pelos meus primeiros ensinamentos, pelas orientações e motivações, e aos mestres e doutores do curso de engenharia mecânica pelos valores acadêmicos, pelas horas dedicadas aos estudos e a tudo que aprendi sobre ciências mecânicas e por todo o ensinamento profissional, sem o qual não seria possível realizar este trabalho.

E a todas as pessoas que direta e indiretamente me apoiaram e depositaram sua fé para que eu conquistasse minhas vitórias e realizasse este trabalho.

“Determinação coragem e autoconfiança são fatores decisivos para o sucesso. Se estamos possuídos por uma inabalável determinação conseguiremos superá-los. Independentemente das circunstâncias, devemos ser sempre humildes, recatados e despidos de orgulho”

Dalai Lama

RESUMO

A lubrificação é uma atividade muito importante para diminuir o atrito de superfícies em contato, assim reduzindo os desgastes e preservando as peças das máquinas. Os equipamentos utilizados na moagem de processamento de minério são os moinhos, que são grandes máquinas de alta potência, suas engrenagens de acionamento sofrem alta carga de transmissão, tem elevado atrito de contato, gerando muito calor nos flancos dos dentes, e por isso necessitam de atenção constante da manutenção, especialmente da lubrificação. Na ALUMAR, houve a oportunidade de substituição da graxa lubrificante das engrenagens de acionamento dos moinhos de bauxita por um óleo com propriedades específicas para este tipo de trabalho; este que além de ser benéfico para as engrenagens tem possibilidade de reduzir os custos de lubrificação destes equipamentos. O trabalho apresenta os parâmetros relevantes da substituição da graxa pelo óleo, como temperatura, vibração e consumo de massa, mediante vários testes e relatórios técnicos analisados por meio de um histórico de acompanhamento dos dados com a graxa e após a aplicação do óleo, que após o uso deste novo lubrificante das engrenagens, houve a redução da temperatura em 7° C, e da vibração e do consumo de massa que foi reduzido em 50%, objetivando a validação e aprovação deste novo fluido, para posterior aplicação em todos os outros moinhos.

Palavras-Chave: Lubrificação; Engrenagens; Moinhos; Engenharia; Manutenção

ABSTRACT

The mills used in mining are large and robust equipment that require high power for their operation, as the drive gears that have high load transmission, high contact friction generating heat, and therefore require constant attention of maintenance, especially lubrication, which must be appropriately. Lubrication is very important to prevent attrition, faults or breaks where there is friction between two metal surfaces such as the sides of the teeth of a gear pair. In ALUMAR had necessity to replace the grease of the drive gears in the bauxite mills, for an oil with excellent properties for this type of work; this in addition to being beneficial to gears is able to reduce lubrication costs of this equipment. The monograph show relevant parameters of replacing the grease in the oil, such as temperature, vibration and mass consumption, through various tests and technical reports analyzed using a historical tracking data with grease and after application of oil, which after the use of this new lubricant of gears, there was a reduction of temperature 7 ° C, and vibration and mass consumption was reduced by 50%, aiming at the validation and approval of new fluid for subsequent application in all other mills.

Key Words: Lubrication; Gears; Mills; Engineering; Maintenance

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1: Um das primeiras evidências de tentativa de redução de atrito	16
Figura 2: Ilustração do processo químico de refino em torres de destilação do petróleo.	18
Figura 3: Comportamento de um fluido localizado entre duas placas paralelas	23
Figura 4: Viscosidade dinâmica de alguns fluidos em função da temperatura.	24
Figura 5: Diagrama de bloco	26
Figura 6: Cisalhamento em superfícies	27
Figura 7: Adesão	28
Figura 8: Desgaste por adesão em um eixo, devido à falha de lubrificação adequada.	29
Figura 9: Coeficiente de desgaste por adesão	29
Figura 10: Exemplo de falhas superficiais	30
Figura 11: Nomenclatura de um mancal de deslizamento	31
Figura 12: Formação da cunha e distribuição de Pressão	32
Figura 13: Lubrificação Forçada em motor de combustão interna	34
Figura 14 Acessórios utilizados em lubrificação em geral	35
Figura 15: Sistema de lubrificação centralizado	36
Figura 16: Exemplos de Lubrificação Centralizada	36
Figura 17: Par de engrenagens.	37
Figura 18: Nomenclatura usual de engrenagens	38
Figura 19: Engrenagens cilíndricas de dentes retos	39
Figura 20: Engrenagens cilíndricas de dentes helicoidais	40
Figura 21: Engrenagens Cônicas	40
Figura 22: Coroa e pinhão sem-fim	41
Figura 23: Moinhos Horizontal	42
Figura 24: Moagem Fechado	43
Figura 25: Moinho horizontal	43
Figura 26: Simulação de lançamento de bolas	44
Figura 27: Moinho de Bolas	45
Figura 28: Componentes de um moinho horizontal	45
Figura 29: Diagrama resumo do processo Bayer	46
Figura 30: Acionamento dos moinhos do moinhos 41 e 51	49
Figura 31: Acionamento dos moinhos 21/31/22/32	50

Figura 32: Mancal Flutuante, moinho de barras, ALUMAR	51
Figura 33: Mancal fixo, moinho de barras, ALUMAR	52
Figura 34: Exemplo de Sistema Pulverizado	53
Figura 35: Coroa de acionamento, moinho de barras, ALUMAR	54
Figura 36: Diagrama do sistema de lubrificação	55
Figura 37: Recomendações Kluber para lubrificação de engrenagens	55
Figura 38: Engrenagens do moinho, setas indicam o sentido de rotação	56
Figura 39: Orientações de medição nos testes do lubrificante	58
Figura 40: Equipamentos utilizados nos testes de lubrificação	58
Figura 41: Gráfico temperatura dos dentes das engrenagens Moinho 41	63
Figura 42: Gráfico vibrações dos mancais livre eixo axial pinhão saída moinho 41	64
Figura 43: Gráfico vibrações dos mancais livre eixo vertical pinhão saída moinho 41	65
Figura 44: Gráfico vibrações dos mancais livre eixo horizontal pinhão saída moinho 41	65
Figura 45: Gráfico vibrações dos mancais fixo eixo axial pinhão entrada moinho 41	66
Figura 46: Gráfico vibrações dos mancais fixo eixo vertical pinhão entrada moinho 41	66
Figura 47: Gráfico vibrações dos mancais fixo eixo horizontal pinhão entrada moinho 41	67
Figura 48: Gráfico temperatura dos dentes das engrenagens moinho 31	68
Figura 49: Gráfico vibrações do mancal livre do pinhão do moinho 31	69
Figura 50: Gráfico vibrações do mancal fixo do pinhão do moinho 31	70
Figura 51: Fotos das engrenagens dos moinhos 31 e 21	71
Figura 52: Imagens Termográficas dos pinhões dos moinhos 31 e 21	71

LISTA DE QUADROS

Quadro 1: Vantagens da utilização das graxas	21
Quadro 2: Dados Técnicos moinhos de Bolas	48
Quadro 3: Código dos nomes dos componentes de acionamento do moinho 41	49
Quadro 4: Código dos nomes dos componentes de acionamento do moinho 31	50
Quadro 5: Temperatura da coroa Moinho 41	59
Quadro 6: Temperatura do pinhão de entrada Moinho 41	59
Quadro 7: Temperatura do pinhão de saída Moinho 41	60
Quadro 8: Vibrações do pinhão de entrada Moinho 41	60
Quadro 9: Vibrações pinhão de saída Moinho 41	61
Quadro 10: Temperatura da coroa Moinho 31	61
Quadro 11: Temperatura do pinhão Moinho 31	62
Quadro 12: Vibrações nos mancais do pinhão Moinho 31	62
Quadro 13: Código Nomenclatura dos mancais	64
Quadro 14: Alterações no sistema de lubrificação centralizado das engrenagens	72

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	14
1.1	OBJETIVOS	14
1.2	METODOLOGIA	15
2	REVISÃO DE LITERATURA	16
2.1	LUBRIFICANTES	16
2.2	LUBRIFICAÇÃO	26
2.3	ENGRENAGENS	37
2.4	MOINHOS DE MINERAÇÃO	42
3	MATERIAL E MÉTODOS	57
3.1	TESTES COM NOVO LUBRIFICANTE	57
4	RESULTADOS E DISCUSSÃO	63
5	CONSIDERAÇÕES FINAIS	73
	REFERÊNCIAS	74
	ANEXOS	76

1 INTRODUÇÃO

O princípio básico da lubrificação é a redução do atrito entre duas superfícies em movimento relativo, assim diminuindo o desgaste e evitando superaquecimento das peças. Uma lubrificação ideal, aplicada de modo adequado e em periodicidade correta, aumenta a vida útil das peças, reduz possíveis paradas inesperadas do equipamento e certamente diminui os custos devido à falha repentina e prematura de um equipamento.

A lubrificação é uma das atividades mais antiga desenvolvidas pelo Homem, a primeira evidencia de peças que foram lubrificadas trata de 2600/1700 a.C no velho Egito, onde um tipo de trenó transportando um monumento de pedra é lubrificado por um homem que despeja um líquido nos deslizadores do trenó, (CARRETEIRO 2006).

Na refinaria de alumina da ALUMAR na área responsável pela moagem da bauxita onde ficam os moinhos de mineração, que são grandes equipamentos que são utilizados para a moagem do minério, para acioná-los existe um sistema de engrenagens de dentes helicoidais de alta potência e transmissão. Este sistema anteriormente era lubrificado utilizando um determinado tipo de graxa asfáltica. Devido ao alto consumo e alto custo da graxa, deu-se a necessidade de usar um novo tipo de lubrificante para as engrenagens.

1.1 OBJETIVOS

Estudar a sistemática de lubrificação de um moinho através do monitoramento de parâmetros de temperatura, vibração e redução de massa do lubrificante.

- ✓ Descrever sobre lubrificantes e lubrificação;
- ✓ Pesquisa sobre engrenagens e seus acionamentos;
- ✓ Levantamento sobre moinhos utilizados em mineração;
- ✓ Testes com novo lubrificante;
- ✓ Análise dos dados e avaliação dos ganhos físicos e econômicos com o novo óleo e possíveis melhorias ao sistema.

1.2 METODOLOGIA

Este trabalho foi realizado como estudo de caso em engenharia mecânica com foco na manutenção, ele foi desenvolvido na fábrica ALUMAR, um consorcio formado por três empresas ALCOA, BHP BILLITON e ALCAN, especificamente na Refinaria de alumina da fábrica. O trabalho partiu de pesquisas e levantamento de dados na área de moagem de bauxita da refinaria de alumina e de pesquisas em livros e normas para aprofundamento do assunto sobre lubrificação e lubrificantes. O trabalho foi realizado analisando a troca do lubrificante de um moinho de bauxita, coletando informações de temperatura das engrenagens, vibrações dos mancais, e da massa utilizada na lubrificação.

Analisando de forma evolucionaria, comparando, os dados com a lubrificação por graxa asfáltica SF-100 BEL REY, e depois da aplicação do óleo KLUBER C-F3, para haver uma comparação direta do uso do novo lubrificante na lubrificação das engrenagens do moinho. Os materiais utilizados para levantamento de dados são os seguintes: analisador de vibração, câmera termográfica, pistola termômetro IR, balança para medir a massa do lubrificante.

A aplicação e coleta dos dados foram segundo normas e referencias do fornecedor do novo lubrificante, a KLUBER, e após quatro meses de uso do óleo, comparando a temperatura de um moinho que tem o óleo C-F3 com um moinho que utiliza o lubrificante a base de graxa asfáltica SF-100, por meio de imagens termográficas e assim podendo fazer as mudanças necessárias no sistema centralizado de lubrificação das engrenagens e ampliando para os outros equipamentos.

2 REVISÃO DE LITERATURA

2.1 LUBRIFICANTES

A história dos lubrificantes modernos está diretamente relacionada à do petróleo e suas técnicas de destilação. Mas uma das primeiras evidências sobre lubrificação foi de um achado no Egito, no túmulo de *Ra-Em-Ka* (2600/1700 a.C.) é mostrado um trenó transportando um gigantesco monumento um homem lubrificando as rodas, comprovado mais tarde que era sebo de boi ou de carneiro (CARRETEIRO, 2006). Os Egípcios antigos já sabiam da problemática do atrito, eles contornavam esta dificuldade utilizando troncos de árvores abaixo das cargas pesadas ou mesmo molhando a areia do deserto facilitando o transporte, pois esta técnica reduzia a fricção, assim eles conseguiam transportar estatuas e grandes pedras, (Resuelven el misterio de cómo construyeron las pirámides de Egipto, BBC, 2015).

Pesquisadores da Universidade de Amsterdam descobriram na tumba Djehutihotep (1914-1852 a.C), uma evidencia de como os egípcios superaram o atrito e transportavam suas construções A Figura 1 é apresentado homens puxando um tipo de trenó, transportando uma estátua gigantesca, dá para notar um homem jogando um liquido para tentar facilitar o transporte do monumento pesado, (Resuelven el misterio de cómo construyeron las pirámides de Egipto, BBC, 2015).

Figura 1: Uma das primeiras evidencia de tentativa de redução de atrito, Egito 1914-1852 a.C.



Fonte: Resuelven el misterio de cómo construyeron las pirámides de Egipto, BBC, 2015

E por meio desta técnica que os egípcios poderiam ter transportado todas as gigantescas pedras para construção das pirâmides e transportar todos os outros monumentos gigantescos do antigo Egito, (História da Lubrificação, BOZZA, 2015).

Muitas outras civilizações se depararam com o atrito, suas maiores fontes de lubrificantes eram de origem animal e vegetal, o sebo de boi era utilizado pelos Romanos para lubrificar as rodas dos carros de guerra, e até mesmo o óleo de baleia era utilizado pelos Vikings para lubrificar mastros de navio a vela, afirma Carreteiro (1975).

As civilizações antigas utilizavam o petróleo ou óleo de pedra, basicamente para a iluminação, e só no século XV que ele foi utilizado para o uso na lubrificação, (História da Lubrificação, BOZZA, 2015).

A problemática que existe em reduzir o atrito é antiga, pois é uma força contrária que causa dificuldade de movimento, e aumenta o desgaste das peças e dos equipamentos. Para diminuir o atrito foram desenvolvidos ao longo do tempo técnicas de lubrificação e novos lubrificantes específicos para cada aplicação. Com a descoberta das técnicas de destilação, de refino e tratamento químico, os lubrificantes derivados do petróleo os chamados óleos minerais, e mais tarde os óleos sintéticos, passaram a ser os mais utilizados em todo e qualquer necessidade de lubrificação moderna.

2.1.1 Petróleo

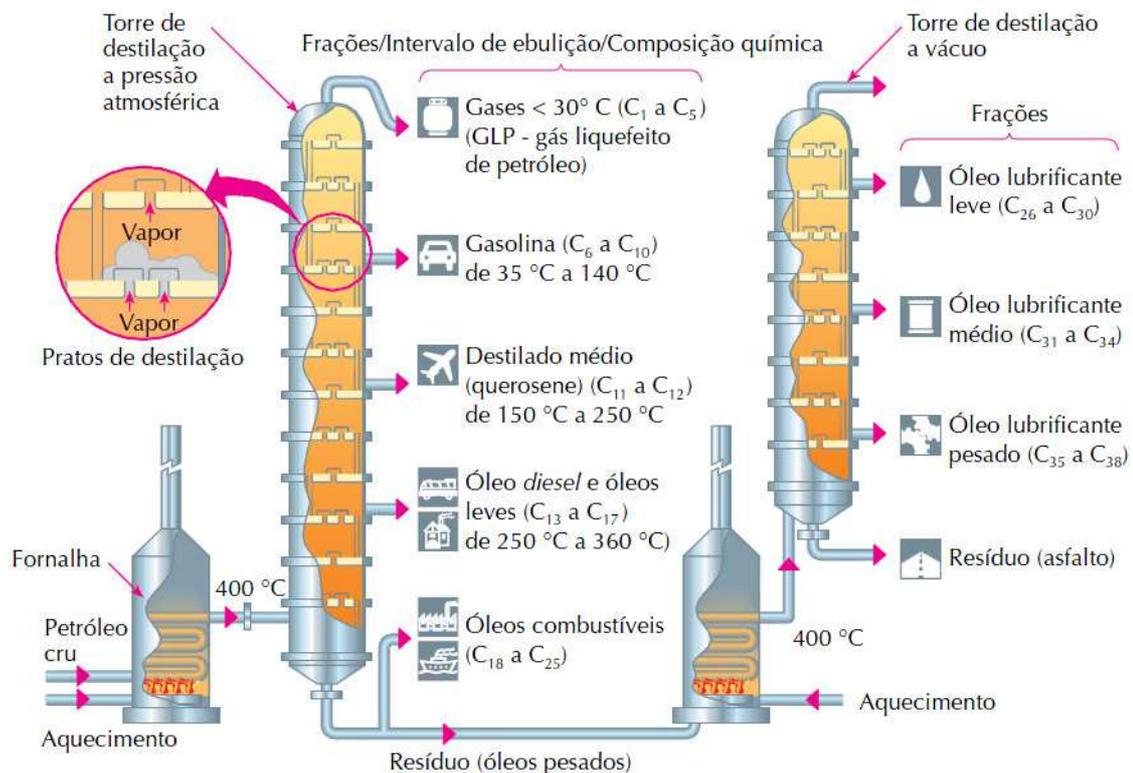
O petróleo do latim *petrae* (pedra) e *oleum* (óleo) ou óleo de pedra tem origem em pequenos seres vegetais e animais da orla marítima, que foram soterrados há milhões de anos, pela ação de microrganismos, da pressão, do calor e do tempo, transformou esta matéria orgânica no petróleo que conhecemos, (FELTRE, 2004). As primeiras civilizações utilizavam o petróleo para fins de iluminação e medicinais, e um pouco para a lubrificação. E com o advento das técnicas de destilação e refino do petróleo é que surgiram os óleos lubrificantes modernos.

A refinaria é onde o petróleo é transformado em combustíveis, lubrificantes, asfalto, plásticos, entre outros produtos. É realizado por meio de tratamentos de processo de separação, processo de conversão e processo de tratamento químico, afirma Carreteiro (1975).

O processo químico das refinarias de petróleo começa com o óleo cru, que passa por uma transformação de aquecimento e resfriamento em torres especiais, além de uma transformação química final (retirada de rejeitos) para se poder produzir todos os vários tipos de derivados do petróleo.

Feltre (2004) afirma que o refino é o processo que separa o petróleo em frações de diversas faixas de ebulição em uma torre de destilação. O processo consta em evaporar e condensar o óleo cru, onde é normalmente feita em dois estagio. O primeiro o óleo cru entra em uma fornalha onde é aquecido, em seguida passa pela torre de destilação à pressão atmosférica, onde já são separadas várias frações mais leves. Depois o que sobra, um óleo mais pesado, passa por uma segunda fornalha, mas agora a destilação é a vácuo, onde são produzidos vários óleos lubrificantes e resíduos sólidos, ver Figura 2.

Figura 2: Ilustração do processo químico de refino em torres de destilação do petróleo.



Fonte: FELTRE, 2004

2.1.2 Óleos Minerais

Na indústria são os óleos mais empregados, são originados do petróleo, e suas propriedades são baseadas tanto na do petróleo bruto, quanto ao processo químico que lhe dá origem. São compostos basicamente de carbono e hidrogênio, sob a forma de hidrocarbonetos, (FELTRE, 2004).

Os óleos minerais são agrupados conforme suas cadeias ou séries químicas de hidrocarbonetos, sendo cada série diferente, com relação própria de números de átomos de carbono e hidrogênio, (HOLWEGGER, 2013).

Os petróleos de base parafínica não contem somente asfalto, já os petróleos de base asfáltica, constituídos basicamente por hidrocarbonetos naftênicos, não apresentam parafinas, quando os petróleos apresentam concomitantemente proporções razoáveis de asfalto e parafina, são classificados como base mista, sendo constituídos por hidrocarbonetos parafínicos, naftênicos e aromáticos, (CARRETEIRO, 2006).

2.1.3 Óleos Graxos

Os primeiros óleos lubrificantes foram os óleos de origem vegetais e animais, hoje são quase totalmente substituídos pelos óleos minerais que apresentam propriedades de maior resistência contra a oxidação e não se tornam ácidos ou corrosivos, além de terem menor custo, (CARRETEIRO, 1975).

Os óleos graxos apresentam algumas vantagens em relação aos minerais, por possuírem pequenas quantidades de ácidos graxos livres de afinidade polar, exercem uma atração que gera uma adsorção molecular na interface metal – óleo, permitindo maior permanência na superfície, (HOLWEGGER, 2013).

2.1.4 Óleos Compostos

Holweger (2013) afirma que os óleos compostos basicamente são misturas de óleos minerais com óleos graxos a fim de adicionar maior oleosidade ou mais facilidade de emulsão em presença de vapor d'água. Um das aplicações mais comuns de óleos compostos são em grandes carregamentos e em turbinas a vapor. Os óleos compostos são na maioria formados por 1 a 25% podendo chegar a 30% de óleos orgânicos em óleos minerais.

2.1.5 Óleos Sintéticos

Na indústria moderna há a necessidade por óleos especiais, que mantêm suas propriedades mesmo sob altas temperaturas e cargas, além de outras condições adversas, por isso os óleos sintéticos são produzidos conforme sua aplicação e condições de trabalho. Holweger (2013) classifica os óleos sintéticos em cinco principais grupos conforme sua base de origem.

a) Ésteres de ácidos dibásicos: Superiores aos óleos minerais em relação à viscosidade – temperatura e menos voláteis. Em relação à lubrificidade, estabilidade térmica e resistência à oxidação são similares aos bons óleos de origem do petróleo. Uma aplicação é em turbinas de motores a jato.

b) Ésteres de Órganofosfato: Tem excelente lubrificidade, e não são inflamáveis como os óleos minerais. Tem baixa volatilidade, e boa relação de viscosidade temperatura em relação aos óleos de origem do petróleo. Estes tipos de óleos sintéticos são muito bons em relação à resistência a oxidação, mas sua estabilidade só é satisfeita até 150°C. São utilizados como fluidos hidráulicos, em trabalho com temperaturas é necessária.

c) Ésteres de Silicatos: Estes compostos possuem qualidades de baixa volatilidade e relação viscosidade-temperatura que os colocam entre os melhores óleos sintéticos de aplicação industrial. Depósitos abrasivos podem ser formados a temperatura superior de 200°C, em presença com a água forma silicatos que são muito abrasivos.

d) Silicones: São fluidos que são polímeros de metil-siloxano, polímeros de fenil-siloxano ou polímero de metil-fenil-siloxano. O teor de fenil aumenta a estabilidade ao calor, mas diminui o índice de viscosidade, embora sempre maior que os de óleos minerais. São muito utilizados onde se deseja aplicar a mancais de deslizamento com grandes cargas.

2.1.6 Graxa lubrificante

Segundo Carreiro (2006) a graxa é uma combinação semi-sólida de produtos de petróleo e um sabão ou mistura de sabões, adequada para certos tipos de lubrificação, resultando em um produto homogêneo com qualidades lubrificantes. As graxas lubrificantes têm a propriedade de em serviço ficarem com uma viscosidade mais baixa e em repouso mais alta, e esta característica torna a aplicação das graxas onde os óleos não seriam possíveis, veja o Quadro 1.

Quadro 1: Vantagens da utilização das graxas

Em mancais de rolamento:	Em mancais de deslizamento:	Em engrenagens:
Boa retenção;	Boa retenção;	Boa retenção, principalmente em engrenagens abertas;
Lubrificação instantânea na partida;	Resiste ao choque;	Resiste à ação de remoção proveniente da força centrífuga;
Mínimo vazamento;	Permanece onde necessário nas partículas e operações intermitentes.	Resiste à pressão de carga nos dentes.
Permite uso de mancais selados;		
Elimina contaminação;		
Permite operação em várias posições;		
Requer aplicação menos frequentes;		
Baixo consumo.		

Fonte: CARRETEIRO, 2006

As graxas são empregadas nos pontos onde os óleos não seriam eficazes em face de sua tendência natural a escorrerem, por mais viscosos que sejam. São usados também quando é conveniente formar-se um selo protetor, evitando-se a entrada de contaminantes, por exemplo, em aplicação em mancais de rolamentos, evitando a entrada de poeira e outros contaminantes (HOLWEGGER, 2013). As graxas são compostas por sabões que são suas bases de formação, as graxas mais comuns são à base de alumínio, cálcio, sódio, lítio bário.

2.1.7 KLUBER C-F3 ULTRA e BEL REY SF 100

O KLUBER C-F3 ULTRA foi óleo utilizado nos testes da lubrificação as engrenagens dos moinhos. A família de produtos Kluberfluid[®] C-F Ultra da KLUBER LUBRICATION é recomendada para a lubrificação de engrenagens de acionamento de moinhos de mineração, pois ela suporta elevadas cargas, possui excelente adesão, e máxima proteção contra desgastes, pode ser utilizada em forma de banho em cárter ou mesmo pulverizada, (La lubricación de grandes transmisiones de corona dentada, Kluber Lubrication, 1997).

O óleo C-F3 Ultra é um fluido com composição de hidrocarbonetos sintéticos com óleos minerais e aditivos, a viscosidade é muito alta, aproximadamente 16500 cSt a 40 °C, com densidade aproximada de 0,92 g/cm³ a 20 °C.

O BEL REY SF-100 da família de produtos Molyube[®] é uma graxa que era utilizada na lubrificação dos moinhos. É uma graxa com partículas asfáltica, com uma mistura semi sintética e mistura de sabão a base de alumínio e aditivos de extrema pressão, própria para lubrificação de engrenagens de grade porte. Tem uma viscosidade de 36675 cSt a 40° C,

A viscosidade do SF-100 e a adesão molecular na superfície metálica é bem menor do que em relação ao C-F3, assim o novo lubrificante possui melhores propriedades físico químicas do que em relação ao graxa asfáltica.

No Anexo A e B é apresentado as propriedades dos lubrificantes KLUBER C-F3 e BEL REY SF-100, respectivamente.

2.1.8 Viscosidade

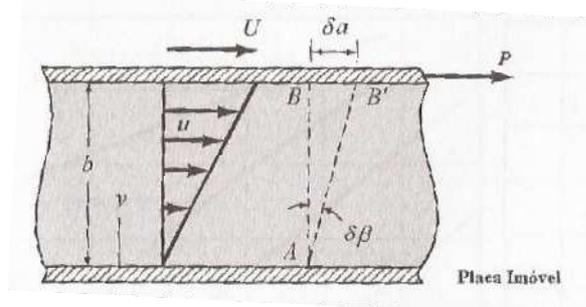
A qualidade final de um lubrificante somente é comprovada em serviço, no equipamento em uso, ela está ligada diretamente à composição química, resultado das propriedades do petróleo, do seu refino e dos aditivos e balanceamento das formulações. Estas características imprimem nos lubrificantes certas propriedades físicas e químicas que permitem um controle da uniformidade e nível de qualidade, afirma Carreteiro (2006).

Segundo Hamrock (2004) a viscosidade do óleo tem importância fundamental na lubrificação. A viscosidade de um fluido é a propriedade que determina o valor de sua resistência ao cisalhamento, ela é devida a interação entre as moléculas do fluido.

Para determinar esta propriedade, considere o experimento hipotético, colocando entre duas placas rígidas um fluido como a água, veja a Figura 3, quando força P é aplicada na placa superior, está se movimentando continuamente com uma velocidade U . Este comportamento é considerado com a definição de fluido, se uma tensão de cisalhamento é aplicada num fluido, ele se deformará continuamente, segundo Munson (2004).

Uma análise mais detalhada do movimento do fluido revelaria que o fluido em contato com a placa superior se move com a velocidade da placa U , que o fluido em contato com a placa inferior apresenta velocidade nula e que o fluido entre as duas placas se move com velocidade $u = Uy/b$. Existe um gradiente de velocidade, du/dy no escoamento entre as placas, (MUNSON, 2004).

Figura 3: Comportamento de um fluido localizado entre duas placas paralelas



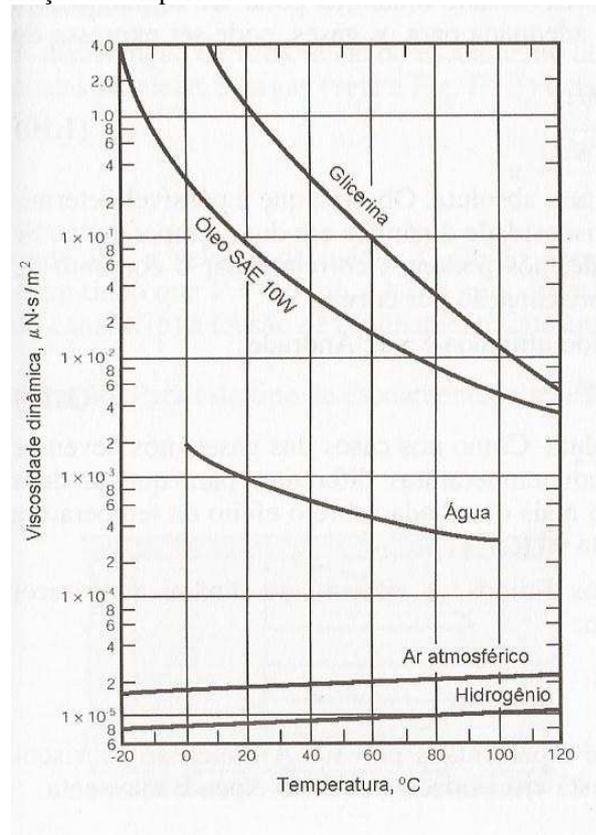
Fonte: MUNSON, 2004

Assim para os fluidos comuns (newtonianos), a tensão de cisalhamento e a taxa de deformação por cisalhamento, gradiente de velocidade, podem ser relacionadas com a equação 1.

$$\tau = \mu \frac{du}{dy} \quad (1)$$

O valor de μ é denominado viscosidade dinâmica do fluido, muda de fluido para fluido e varia conforme a mudança de temperatura. Na Figura 4 é apresentado a viscosidade dinâmica x temperatura, para alguns fluidos.

Figura 4: Viscosidade dinâmica de alguns fluidos em função da temperatura.



Fonte: MUNSON, 2004

A viscosidade dos líquidos decresce com o aumento da temperatura e a dos gases cresce quando a temperatura do gás aumenta. Esta diversidade de comportamento pode ser atribuída à diferença que existe entre a estrutura molecular dos gases e a dos líquidos, os espaços entre as moléculas dos líquidos são pequenas em relação à dos gases, as forças coesivas entre as moléculas são fortes e a resistência ao movimento relativo entre as camadas de líquidos está relacionada às forças intermoleculares. Quando a temperatura aumenta, estas forças coesivas são reduzidas e isto provoca a redução da resistência ao movimento. Como a viscosidade dinâmica está diretamente relacionada a esta resistência, há uma redução da viscosidade dinâmica com o aumento da temperatura, (HAMROCK, 2004).

Munson (2004) afirma que para os gases, as moléculas estão bem mais espaçadas, as forças moleculares são desprezíveis e a resistência ao movimento relativo é devida as

trocas de quantidade de movimento das moléculas de gás localizadas em camadas adjacentes. As moléculas em um gás podem ser transportadas pelo movimento aleatório de uma região que apresenta velocidade baixa para outra que apresenta velocidade mais alta. Quando a temperatura do meio aumenta, a atividade molecular aumenta (as velocidades aleatórias aumentam) e assim aumenta-se a viscosidade dinâmica dos gases. A equação 2 mostra a viscosidade cinemática em relação à viscosidade dinâmica e da massa específica de um fluido qualquer.

$$v = \frac{\mu}{\rho} \quad (2)$$

2.1.9 Aditivos para lubrificantes

Os aditivos são compostos químicos que são adicionados aos óleos básicos, melhoram algumas de suas propriedades e eliminam ou diminuem as propriedades indesejáveis. Os aditivos EP são de grande interesse de estudo e pesquisa. Usando na lubrificação limítrofe extrema, é de grande emprego na lubrificação de engrenagens, com grandes vantagens mecânicas, apresentam severas exigências de lubrificação por causa da elevada carga e velocidade de deslizamento e altas temperaturas desenvolvidas pelo atrito, (HOLWEGER, 2013).

Holweger (2013) ainda afirma que a carga é progressivamente crescente, em um sistema lubrificado, por exemplo, em um par de engrenagens, a película formada pelo óleo lubrificante se torna mais fina, o desgaste abrasivo aumenta e como a carga é elevada, cada vez mais é eventualmente atingido um ponto onde há uma junção, ou ponto de solda nas duas superfícies, seguida de uma “crateração” de partículas de metal. A lubrificação EP envolve uma reação química sobre as superfícies onde em consequência da elevada pressão, alta velocidade de deslizamento e temperaturas muito elevadas, ela é acelerada protegendo as superfícies em contato, evitando a crateração e reduzindo o atrito, a reação se processa entre um ingrediente do lubrificante e o metal.

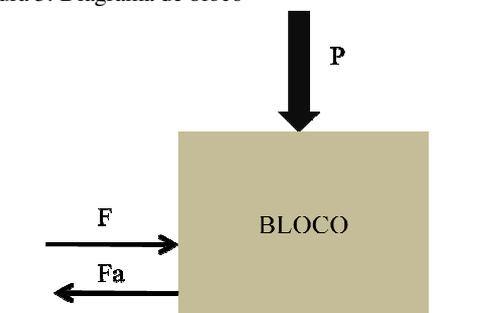
2.2 LUBRIFICAÇÃO

2.2.1 Atrito

Atrito surge numa superfície se movimenta em relação à outra superfície, gerando forças contrárias ao movimento, uma força de resistência ao movimento. Em alguns casos o atrito é necessário como em aplicação de freios, mas, por exemplo, em engrenagens onde o alto atrito entre as superfícies dos flancos dos dentes pode causar aumento de temperatura e gerar falha superficial o atrito é indesejável, e por isso a lubrificação age para minimizar estes danos e evitar que a peça venha a sofrer desgastes, segundo Ahmed (2011).

Carreteiro (2006) afirma que, se dois corpos são colocados em contato e há movimento ou tendência de movimento relativo, resultam forças que se opõem ao movimento ou tendência ao movimento. Na Figura 5 enquanto a força de solicitação F for suficiente para impedir o movimento relativo, o atrito é estático, entretanto se o movimento se inicia o atrito é cinético, P é o peso ou carga no bloco.

Figura 5: Diagrama de bloco



Fonte: Autor

A Equação 3 diz que a força de atrito ou a resistência ao movimento F_a é sempre igual ou maior do que a solicitação de F , onde seu valor máximo pode ser $F=F_a$, esta força é chamada de limite de atrito. Com a continuação do movimento (força F) não há mais o equilíbrio dessas forças, e fica a solicitação maior do que a força de atrito. O valor dessa força recebe influência de muitos outros fatores, e esse conjunto de fatores chamamos de atrito cinético (μ_c). O objetivo primário da lubrificação é a de reduzir o atrito, e sua finalidade é de diminuir o desgaste. Duas superfícies em movimento sofrerão desgaste, mas se houver uma lubrificação adequada o atrito será minimizado, assim evitando o desgaste, (CARRETEIRO, 2006).

$$F_a = \mu_c F \quad (3)$$

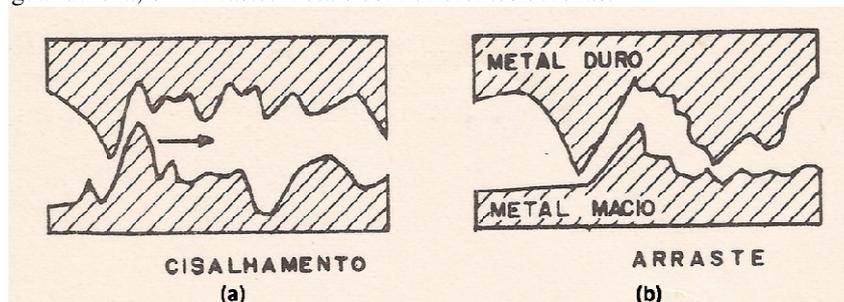
Segundo Hamrock (2004) devido o tipo de contato entre as superfícies em movimento, existem dois tipos de atrito. Atrito sólido, quando há contato de duas superfícies solidas entre si. O Atrito sólido pode ser subdividido em dois grupos:

- Atrito de deslizamento: Quando uma superfície se desloca diretamente contato com outra;
- Atrito de rolamento: Quando o deslocamento se efetua através de rotação de corpos cilíndricos ou esféricos, colocados entre as superfícies em movimento, devido à área ser menor o atrito é menor.

O Atrito fluido é quando existir, separando as superfícies em movimento, uma camada fluida (liquida ou gasosa), o fluido que forma esta camada é chamado de lubrificante. Mesmo as superfícies muito bem polidas podem apresentar asperezas e irregularidades, e como estas se relacionam define o mecanismo de atrito, que pode ser devido ao cisalhamento ou a adesão afirma Carreteiro (2006).

a) Cisalhamento: Acontece quando picos das superfícies entram em contato, o atrito desenvolve pela resistência oferecida pelo solido a fratura dos picos. Se a dureza dos metais for igual haverá desgaste de ambas as superfícies, mas se haver um metal com maior dureza do que o outro este por sua vez desgastara a outra superfície, veja Figura 6.

Figura 6: Cisalhamento em superfícies; a- Cisalhamento puro: metais com igual dureza; b – Arraste: metais com diferentes durezas.



Fonte: CARRETEIRO, 1975

b) Adesão: É o maior responsável pela resistência ao movimento das superfícies, ela se desenvolve em micro pontos com áreas relativamente planas onde há a formação de solda a frio, veja Figura 7.

Figura 7: Adesão, quando a formação de pontos de solda a frio em superfícies relativamente planas.



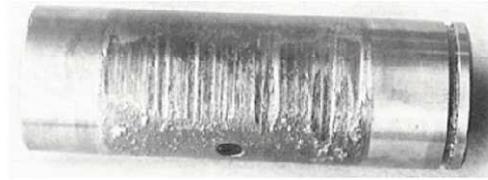
Fonte: CARRETEIRO, 1975

2.2.2 Desgastes em metais

A introdução de um lubrificante na interface onde se dá o deslizamento das superfícies tem vários efeitos benéficos sobre o coeficiente de atrito. Um lubrificante líquido como um óleo mineral é essencialmente incompressível em relação às tensões e cargas nas interfaces de mancais ou nos contatos dos dentes das engrenagens, mas ele tem baixo coeficiente de cisalhamento (viscosidade), assim ele se torna o material de menor resistência na interface e assim reduz o coeficiente de atrito. A falta de lubrificação adequada causa o aumento do atrito nas superfícies em contato, o que gera aumento de desgastes e que pode levar a falha da peça. Existem muitas formas de desgaste devido a falhas superficiais por falta de lubrificação adequada, algumas são: o desgaste por adesão, por abrasão, por corrosão e por micro abrasão, (COLLINS, 2012).

Norton (2013) ainda afirma que o desgaste por adesão é quando suas superfícies são pressionadas umas contra as outras devido a uma carga, os picos da rugosidade das superfícies aderem umas nas outras e os átomos se atraem formando uma espécie de solda a frio. Assim que se aumenta o escorregamento das superfícies estas adesões são quebradas, assim no estágio final, os pedaços de uma superfície são transferidos a outra causando o rompimento superficial e danos a peça, mostrado na Figura 8.

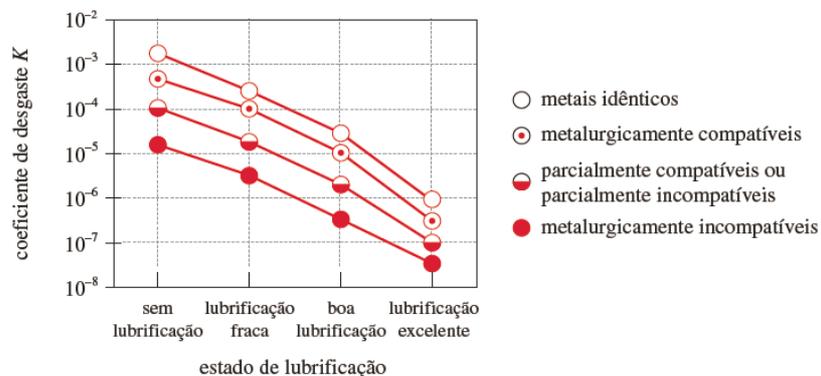
Figura 8: Desgaste por adesão em um eixo, devido à falha de lubrificação adequada.



Fonte: NORTON, 2013

A compatibilidade metalúrgica dos metais afeta diretamente o desgaste por adesão, pois facilita a solubilidade de um átomo com outro, aumentando assim a adesão das superfícies. O projeto de mancais, buchas, eixos, engrenagens deve prever este tipo de compatibilidade ou de incompatibilidade dos metais, para evitar aumento da adesão, e com uma lubrificação adequada reduzir o coeficiente de desgaste, veja o gráfico da Figura 9 como se comporta o desgaste em relação da compatibilidade dos metais e com a lubrificação, (NORTON, 2013).

Figura 9: Coeficiente de desgaste por adesão em função da compatibilidade metalúrgica e da lubrificação



Fonte: Fonte: NORTON, 2013

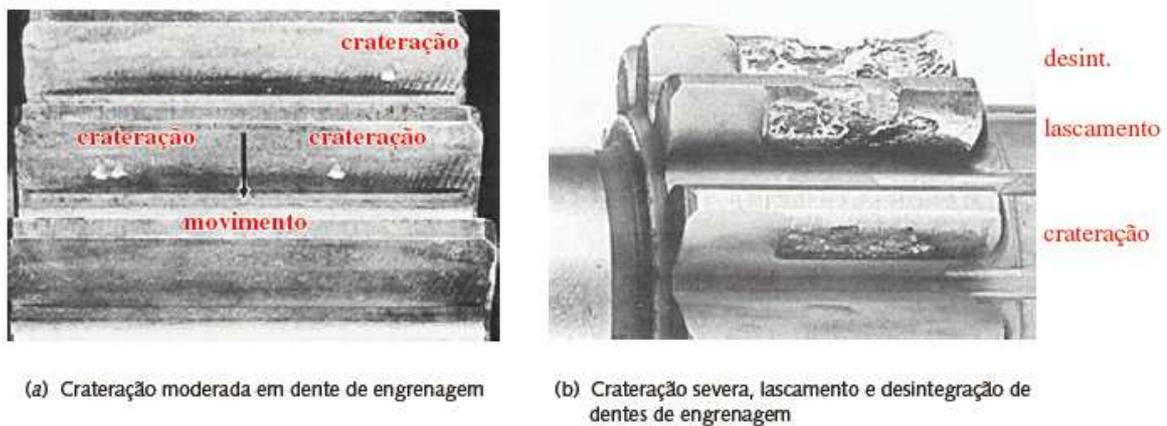
O desgaste por abrasão é quando um material de dureza maior desliza em outro com dureza menor, assim o metal mais duro retira material do metal mais mole. A abrasão é um processo de remoção de material no qual as superfícies afetadas perdem massa a uma taxa controlada ou não, (MOTT, 2015)

Mott (2015) afirma que todas as formas de desgaste superficiais podem ser evitadas, com uma boa lubrificação reduzindo o coeficiente de atrito e o de desgaste, a vida útil da peça ou equipamento pode ser aumentada ou mesmo preservada.

Falhas devido à fadiga superficial nos flancos dos dentes das engrenagens podem causar muitos tipos de desgaste. A fadiga superficial é causada pelos carregamentos repetitivos em ciclos, normalmente estas superfícies se comportam em deslizamento, como no contato de esferas de rolamentos, a fadiga causa altas tensões cíclicas de tração e compressão, e que podem levar a falha na superfície devido à propagação e crescimento de trincas e micro trincas no material.

Norton (2013) classifica as formas de falha por fadiga superficial, que pode ser: crateração é a falha de remoção de pequenas porções de material da superfície; lascamento é o aumento da falha por crateração, a perda de material na superfície fica maior levando a falha da peça, veja na Figura 10.

Figura 10: Exemplo de falhas superficiais por crateração e lascamento devido à fadiga superficial



Fonte: NORTON, 2013

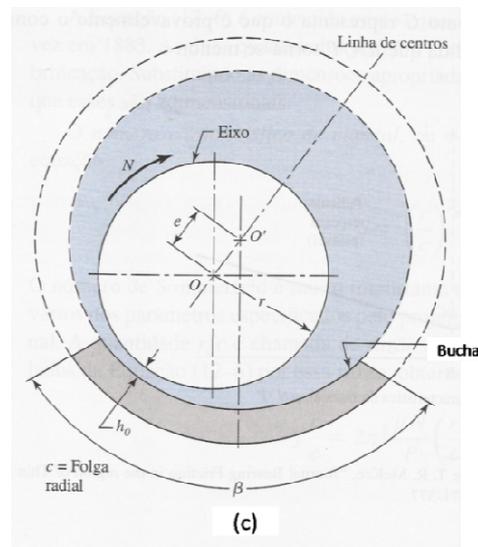
2.2.3 Lubrificação Hidrodinâmica

Segundo Budynas (2011), o objetivo da lubrificação é reduzir o atrito, o desgaste e o aquecimento das partes das máquinas em trabalho. A lubrificação hidrodinâmica, é quando as superfícies de cargas de um mancal estão separadas por uma película espessa (filme lubrificante), evitando o contato entre elas. Para se forma a lubrificação hidrodinâmica

não há a necessidade de o óleo ser injetado em alta pressão, mas sim de quantidade suficiente para poder criar o carregamento (pressão) suficiente para separar as duas superfícies.

Na Figura 11 podemos ver a nomenclatura usual de mancais de deslizamento em lubrificação hidrodinâmica, onde c é a diferença entre os raios da parede do mancal e do eixo, e é a excentricidade ou a distância entre os centros do mancal e eixo, e h_0 é a espessura mínima da película e ela ocorre sempre na direção da linha de centros, e β é o comprimento angular do mancal, (BUDYNAS, 2011).

Figura 11: Nomenclatura de um mancal de deslizamento.



Fonte: BUDYNAS, 2011

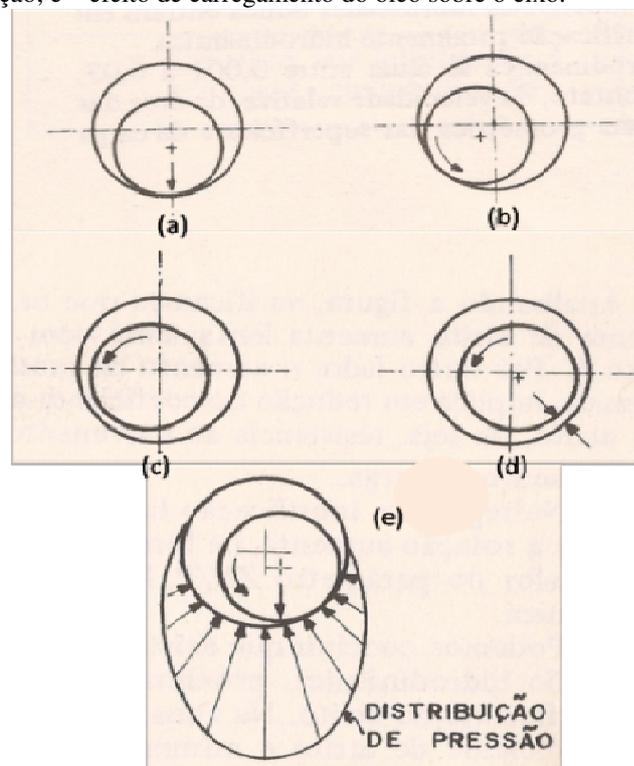
Ahmed (2011) define que a formação de uma película espessa de lubrificante no mancal de deslizamento inicia se quando o eixo em alta rotação é suportado por um carregamento ao redor da câmara do mancal, este filme com forma de cunha, força o eixo no sentido contrário ao da rotação. Assim surgiu uma espessura mínima de película, onde é aplicado no sentido oposto ao da rotação do eixo, surgindo um ponto de pressão na película chegando a um máximo a esquerda do mancal.

Segundo Carreteiro (2006) a lubrificação hidrodinâmica inicial quando devido a rotação do eixo ele tende a movimentar se no sentido contrário, ou seja, subir na parede do mancal, a Figura 12.a o eixo está parado em repouso. Na Figura 12.b, começa a rotação inicial do eixo, e assim o fluido sofre uma pequena compressão, mas a rotação do eixo ainda não é suficiente para desenvolver um filme de óleo completo, a lubrificação não é perfeita, há formação de grande atrito e desgaste das superfícies. Esta fase deve ser a de menor tempo

possível, com o sistema logo deve atingir rotação suficiente para a formação do filme espesso. Na Figura 12.c, a rotação está mais elevada, fazendo a pressão do óleo elevar-se, assim fazendo suportar o próprio eixo e sua carga, neste momento há a formação de uma película completa de lubrificante impedindo o contato do eixo com o mancal, o atrito é mínimo e não há desgaste.

Com o aumento da velocidade de rotação do eixo, a posição do de equilíbrio varia devido à mudança do ponto de pressão do óleo, afirma Carreteiro (2006). Na Figura 12.d o eixo muda de posição devido ao aumento da velocidade de rotação, o que causa um efeito bomba, fazendo o óleo circular dentro do mancal. Devido à mudança do centro de pressão do óleo e do eixo, faz com que o lubrificante aumente de pressão na fase inferior do mancal, sendo máxima no sentido da carga aplicada no eixo, Figura 12.e, depois dessa fase há a circulação do óleo devido à diferença de pressão na câmara do mancal, em alguns casos deve ser injetado óleo novo ou mesmo resfriado em câmara separada, pois o óleo pode aquecer e perde sua viscosidade.

Figura 12: Formação da cunha e distribuição de Pressão; a – Eixo em Repouso; b – Início do movimento; c – rotação do eixo elevada; d – deslocamento do eixo para a direita devido ao aumento da rotação; e – efeito de carregamento do óleo sobre o eixo.



Fonte: CARRETEIRO, 2006

2.2.4 Métodos de Lubrificação

A lubrificação é fundamental para o bom funcionamento de qualquer equipamento e para garantir sua maior vida útil. Já sabemos que uma lubrificação adequada reduz o atrito das partes mecânicas e evitando o desgaste das superfícies em contato. Carreteiro (1975) afirma que para a escolha adequada do equipamento utilizado para a lubrificação é procurar: promover lubrificação correta do equipamento; evitar lubrificar em excesso ou falta; eliminar a falha pessoal; aumentar a produtividade; prolongar a vida útil do equipamento. Ele ainda afirma que para que seja aplicado corretamente o lubrificante deve saber os fatores: tipo de lubrificante: graxa ou óleo; viscosidade; quantidade de lubrificante; custo do dispositivo adequando.

Na indústria normalmente a lubrificação é de responsabilidade das equipes de manutenção, por meio de manutenção preventiva com certos intervalos de tempo, por exemplo, aplicar graxa no mancal de certo motor elétrico a cada 28 dias, o responsável por esta atividade irá fazer esta atividade corretamente. Mas existem certos equipamentos, mais críticos, ou de difícil acesso, que necessitam de lubrificação diária ou com maior precisão, como no caso de mancais de deslizamento sobre lubrificação hidrodinâmica ou de uma ponte rolante, para estes equipamentos existem métodos de lubrificação automatizados e com alta confiabilidade. Carreteiro (2006) classifica os meios de lubrificação por dispositivo, os mais utilizados em equipamento e nas indústrias.

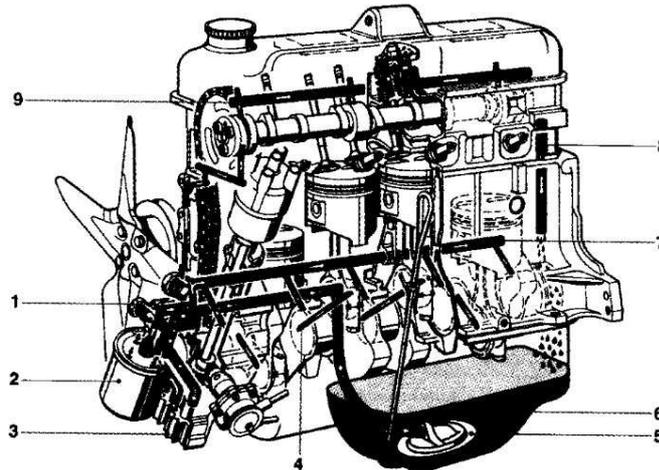
- a) Lubrificação Manual: o método mais simples, mas pode ser ineficiente devido às condições de excesso ou falta de lubrificante, depende do ser humano para a aplicação;
- b) Copo com vareta: método automático, no copo cheio de óleo, se encontra uma agulha que faz descer o fluido que lubrifica o mancal, se o eixo estiver parado a agulha fecha não permitindo a passagem do óleo;
- c) Copo conta gotas: Apresenta a vantagem de se regular a quantidade de óleo a ser utilizado em gotas por minuto, é um método mais eficaz do que os anteriores;
- d) Sistema de circulação: Sistema com mais acessórios, é necessário um reservatório e uma bomba, que faz o óleo circular pelo equipamento;

- e) Lubrificação por anel ou corrente: há um reservatório abaixo do mancal que contém o óleo lubrificante, ao redor do eixo está um anel de diâmetro bem maior com a função de arrastar o óleo até a parte superior, onde tem um anteparo que retém o fluido, fazendo lubrificar e distribuir todo o mancal e eixo, também pode utilizar corrente para maior quantidade de lubrificante ou para óleos mais viscosos;
- f) Lubrificação por circulação forçada: sistema mais complexo que os demais, o óleo é bombeado de um reservatório do equipamento para um reservatório. Contém mais acessórios, como filtros, trocadores de calor, entre outros, e é utilizado em motores de combustão interna, compressores e redutores de grande porte.

Figura 13: Lubrificação Forçada em motor de combustão interna.

Sistema de lubrificação com alimentação forçada

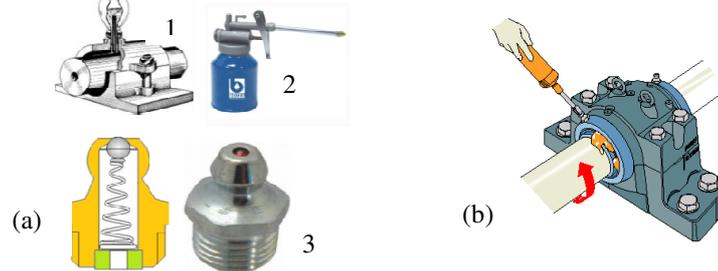
1 Válvula de alívio de pressão; 2 Filtro de óleo; 3 Bomba com engrenagem; 4 Do mancal principal ao mancal da biela; 5 Carcaça da correia de admissão com filtro de tela; 6 Coletor de óleo; 7 Linha principal de alimentação de óleo para os mancais da árvore de manivelas; 8 Linha de retorno do cárter de distribuição; 9 Para os mancais do eixo de comando de válvulas



Fonte: Manual de Tecnologia Automotiva, BOSCH 2005.

- Meios para lubrificação a graxa
 - a) Manual: utiliza-se uma pistola para bombear a graxa por intermédio de um pino graxeiro, que contém uma válvula de retenção;
 - b) Pincel ou espátula: Aplicação manual, onde se usa um pincel ou espátula para lubrificar equipamentos, método muito utilizado para lubrificar engrenagens, correntes e cabos;
 - c) Copo Stauffer: Copo enchido com graxa, onde o lubrificante sai pela parte inferior por meio de orifício, o copo é regulada por uma rosca, que quando chega ao fim deve ser preenchido novamente;
 - d) Enchimento: Utilizado em mancais de rolamento, a graxa é aplicada manualmente até 2/3 da capacidade do reservatório.

Figura 14 Acessórios utilizados em lubrificação em geral; (a): 1 – copo com vareta para lubrificação de mancal; 2 – bomba manual de óleo; 3 – pino graxeiro; (b): Aplicação de graxa em mancal.



Fonte: a1 – CARRETEIRO, 2006, a2 – BOZZA, a3 – TECEM; b - SKF

2.2.4.1 Lubrificação Centralizada

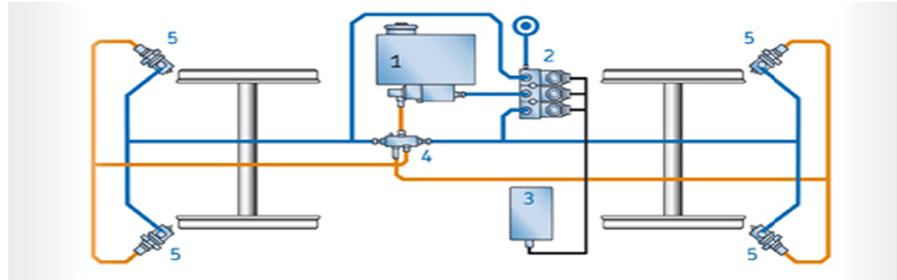
Existem sistemas muito mais complexos e confiáveis, com lubrificação automática e em quantidade certa, este tipo de lubrificação é utilizado em aplicações onde requer muito pontos a serem lubrificados ou onde é necessário ter lubrificação adequada. A lubrificação centralizada é a mais sofisticada entre todos os métodos de lubrificação.

Carreiro (1975) afirma que o sistema centralizado constitui um método de lubrificação a graxa ou óleo, com a finalidade de lubrificar um elevado número de pontos, possibilitando o abastecimento de uma quantidade certa de lubrificação, independentemente de sua localização permitindo a redução da mão de obra de lubrificação.

O sistema centralizado possui muitos acessórios e dispositivos eletromecânicos, como bombas hidráulicas ou pneumáticas, válvulas direcionais, manômetros, válvulas de retenção, conexões tubulares e mangueiras, unidades hidráulicas, entre outros elementos, (CARRETEIRO, 1975). A lubrificação centralizada por ser controlada via remota, por meio de sistemas PLC, *Programmable logic controller* ou Controladores Lógicos Programáveis, muito utilizados nas industriais para sistema de automação e controle, por meio de funções de atuadores e de sensores, (Curso CLP, UERJ). Deste modo o PLC controla a cada momento a hora certa de aplicar o lubrificante, na dosagem correta, e sempre contanto pulsos ou mesmo medindo a temperatura de mancais, tornando este modo de lubrificação avançado e muito confiável. Na Figura 15 vemos um exemplo de aplicação de lubrificação centralizada controlado por PLC em locomotivas ou trens de alta velocidade, a unidade de controle monitora e comanda os atuadores para que seja utilizada a quantidade de lubrificante

necessária em cada roda do trem a cada instante, o sistema funciona por meio da injeção de lubrificante pulverizado a alta pressão, impelido por ar comprimido a alta pressão (cerca de 100 bar), (EasyRail High Pressure, SKF, 2015).

Figura 15: Sistema de lubrificação centralizado em linha dupla para veículos ferroviários.

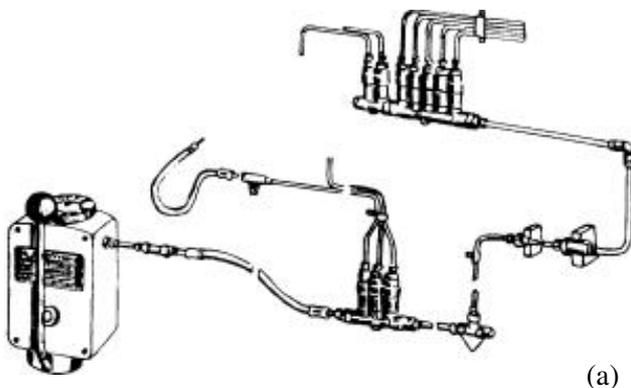


- (1) Bomba de pistão com reservatório**
- (2) Bloco de válvula**
- (3) Unidade de controle com sensor de curva**
- (4) Válvula de controle de lubrificante**
- (5) Bocal de pulverização**

Fonte: SKF

O sistema de lubrificação centralizado pode ser do tipo manual (Figura 16.a), que é mais empregado na lubrificação de pontos de moderada frequência, são circuitos pequenos, e as vezes não necessita do retorno do óleo, e podem ser aplicados em lubrificação de perda total. Existe ainda o sistema automatizado (Figura 16.b) que é empregado onde há a necessidade de lubrificação diária ou contínua, o sistema possui sensores e reguladores que monitoram a quantidade que está sendo lubrificada, se há falha em algum equipamento e também analisam a pressão do sistema (CARRETEIRO, 1975).

Figura 16: Exemplos de Lubrificação Centralizada: a – Operada Manualmente; b – Operada Automaticamente.



(a)



(b)

Fonte: a - CARRETEIRO, 1976; b - DIECKMANN

2.3 ENGRENAGENS

Engrenagens são elementos de máquinas utilizados para transmitir torque e velocidade angular, e possuem uma infinidade de aplicações (NORTON, 2013). Segundo a norma NBR 6174, engrenagem é todo elemento mecânico dentado de forma constante, destinado a transmitir movimento e/ou receber movimento de outro elemento mecânico dentado também de forma constante, pela ação dos dentes em contato sucessivos.

As primeiras engrenagens eram feitas de madeira e já eram utilizadas na China antiga, os desenhos de Da Vinci já mostravam muitas aplicações de engrenagens, afirma Norton (2013). A American Gear Manufacturers Association (AGMA) é uma associação que definiu os conjuntos de normas que padronizam as engrenagens modernas, todas as especificações como número de dentes, ângulo de pressão, material, entre outros, é definido pela AGMA.

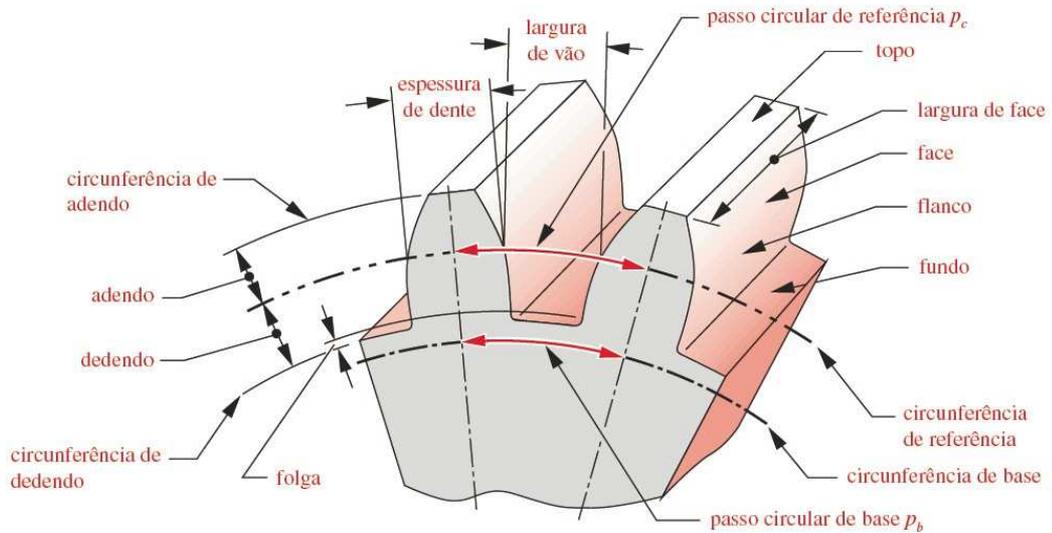
Figura 17: Par de engrenagens, a de diâmetro maior é a coroa, e a de diâmetro menor é o pinhão.



Fonte: MOTT, 2015

A Figura 18 é apresentada a nomenclatura padronizada dos dentes das engrenagens retas. O círculo de referência, círculo primitivo ou diâmetro primitivo é um círculo teórico onde todos os cálculos são baseados. O diâmetro primitivo de um par de engrenagens são tangentes entre si, normalmente a engrenagem de menor diâmetro é chamado de pinhão e a de maior de coroa, afirma Norton (2013).

Figura 18: Nomenclatura usual de engrenagens



Fonte: NORTON, 2013.

O passo circular p é o comprimento do arco ao longo da circunferência do círculo de referência medido de um ponto em um dente ao mesmo ponto no próximo dente, e é definido na Equação 3. O módulo m é a razão entre o diâmetro primitivo e o número de dentes veja a Equação 4.

$$p = \frac{\pi d}{Z} \quad (3)$$

$$m = \frac{d}{Z} \quad (4)$$

Onde:

p = passo circular;

m = módulo;

d = diâmetro primitivo;

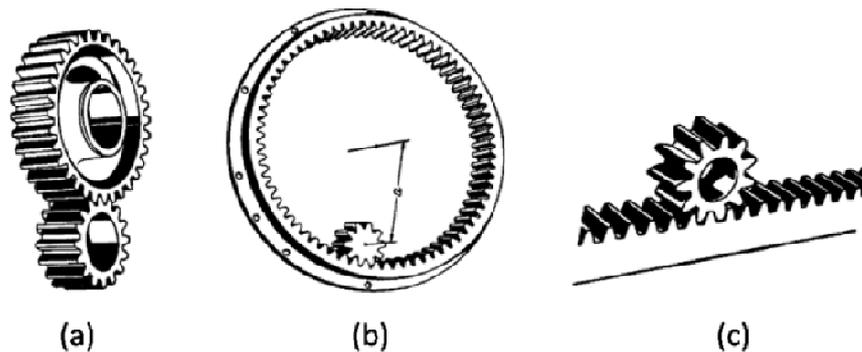
Z = número de dentes da engrenagem.

2.3.1 Engrenagens cilíndricas de dentes retos

São engrenagens que possuem dentes paralelos ao eixo de rotação e são utilizadas para transmitir movimento de um eixo a outro paralelo ao primeiro. São os mais simples e convencionais de todos os tipos de engrenagens padronizados, são muito utilizadas em acionamentos primários, (BUDYNAS, 2011).

Budynas (2011) diz que as engrenagens de dentes retos podem ser de dentes internos ou externos, e ainda do tipo cremalheira. Elas são muito utilizadas em transmissões que necessitam de mudanças de engrenagens em serviço, pois são de fácil acoplagem. Geralmente são utilizadas em transmissão de baixa rotação, mas seus engrenamentos são muito ruidosos.

Figura 19: Engrenagens cilíndricas de dentes retos; a – Convencional; b- Dentes internos; c – Cremalheira



Fonte: NIEMANN, 1971

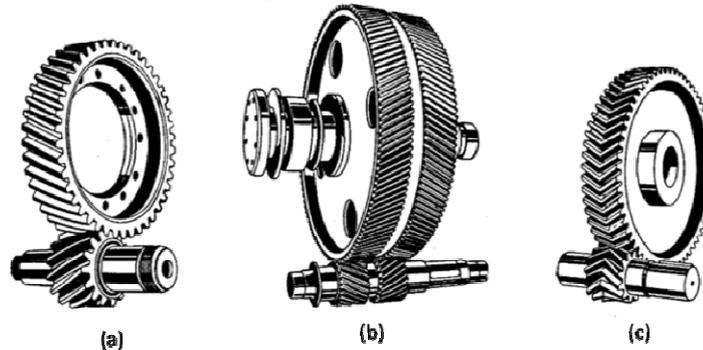
2.3.2 Engrenagens cilíndricas de dentes helicoidais

São engrenagens cilíndricas com dentes inclinados, com certo ângulo de hélice que podem ser à esquerda ou direita. São utilizadas para as mesmas aplicações das de dentes retos, mas pode ser utilizadas em eixos não paralelos, produzem menor ruído devido ao engajamento mais gradual dos dentes. O dente inclinado também gera forças axiais e conjugadas de flexão, que não estão presentes nas de dentes retos, afirma Budynas (2011).

As engrenagens de dentes helicoidais são empregadas em um numero um pouco menor que a de dentes retos, mas podem ser montadas em formas não paralelas, e uma melhor

capacidade de carga e de velocidade. Para evitar as forças axiais geradas nos dentes inclinados projeta-se as engrenagens em formato de espinha de peixe, ver Figura 20, (NIEMANN, 1971).

Figura 20: Engrenagens cilíndricas de dentes helicoidais; a – Normal; b – Eixos reversos; c – Espinha de peixe.

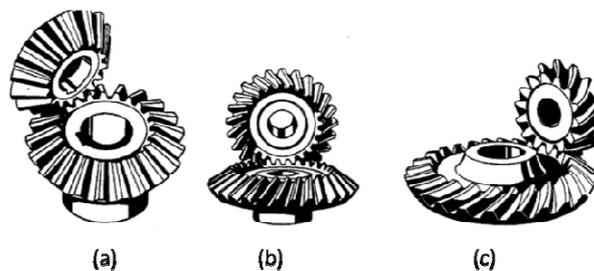


Fonte: NIEMANN, 1971

2.3.3 Engrenagens cônicas

Segundo Budynas (2011) as engrenagens cônicas possuem dentes formados em superfícies cônicas, são utilizadas principalmente para transmitir movimento entre eixos concorrentes e suportam uma alta taxa de carga, mas são tem um custo bem maior do que as cilíndricas. Na Figura 21 vemos três tipos de engrenagens cônicas, as engrenagens cônicas espirais (Figura 21.b) são fabricadas para os dentes não serem retos formando um arco circular, as de dentes curvos, Figura 21.c, é fabricado para altas velocidades. Niemann (1971) afirma que, as engrenagens cônicas são empregadas em relações de transmissão de redução de até 1:6 e para transmissão de multiplicação de 1,2.

Figura 21: Engrenagens Cônicas; a – Dentes retos; b – Dentes helicoidais; c – Dentes curvos.



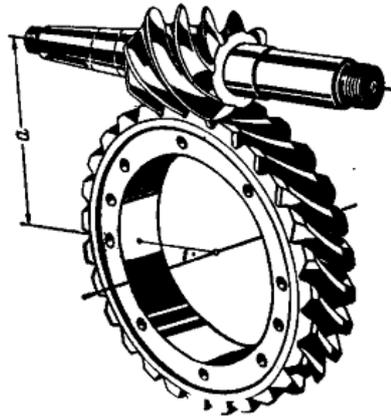
Fonte: NIEMANN, 1971

2.3.4 Engrenagens coroa e pinhão sem-fim

Engrenagem do tipo coroa e pinhão sem-fim, Figura 22, é formado por uma coroa ou roda dentada e pelo pinhão (parecido com um parafuso). O sentido de rotação da coroa depende da direção de rotação do pinhão, seus dentes são cortados para facilitar o engrenamento. São utilizados em aplicações onde a razão de velocidade da coroa e do pinhão for bastante alta, afirma Budynas (2011).

Segundo Niemann (1971), o rendimento deste tipo de transmissão é baixo, a maior parte da potência empregada é transformada em calor e em alguns casos é necessário um sistema de resfriamento.

Figura 22: Coroa e pinhão sem-fim.



Fonte: NIEMANN, 1971

2.4 MOINHOS DE MINERAÇÃO

Os moinhos utilizados na mineração são equipamentos rotativos dotados de alta potência para seu funcionamento, são responsáveis pela moagem, ou quebra de partículas dos materiais utilizados em plantas de processamento. A moagem consiste de combinação de impacto, compressão, abrasão e atrito a um tamanho adequado à liberação do minério, cada minério tem uma malha ótima para ser moído, e é aplicado quando se visa obtenção de granulométricas inferiores a 10 mm. A área responsável pela moagem na indústria requer muito investimento, maior gasto com energia, mas é responsável pelo bom desempenho de uma planta de beneficiamento, (Tratamento do Minério, CETEM, 2004).

Segundo a METSO MINERALS, existem muitos tipos diferentes de moinhos, mas os mais utilizados são os de barras, bolas, barra-bola, moinhos de martelos, do tipo vibratório, estes são alguns moinhos montado na horizontal, mas existem ainda os moinhos verticais, entre outros equipamentos. Na Figura 23 vemos um moinho montado na horizontal.

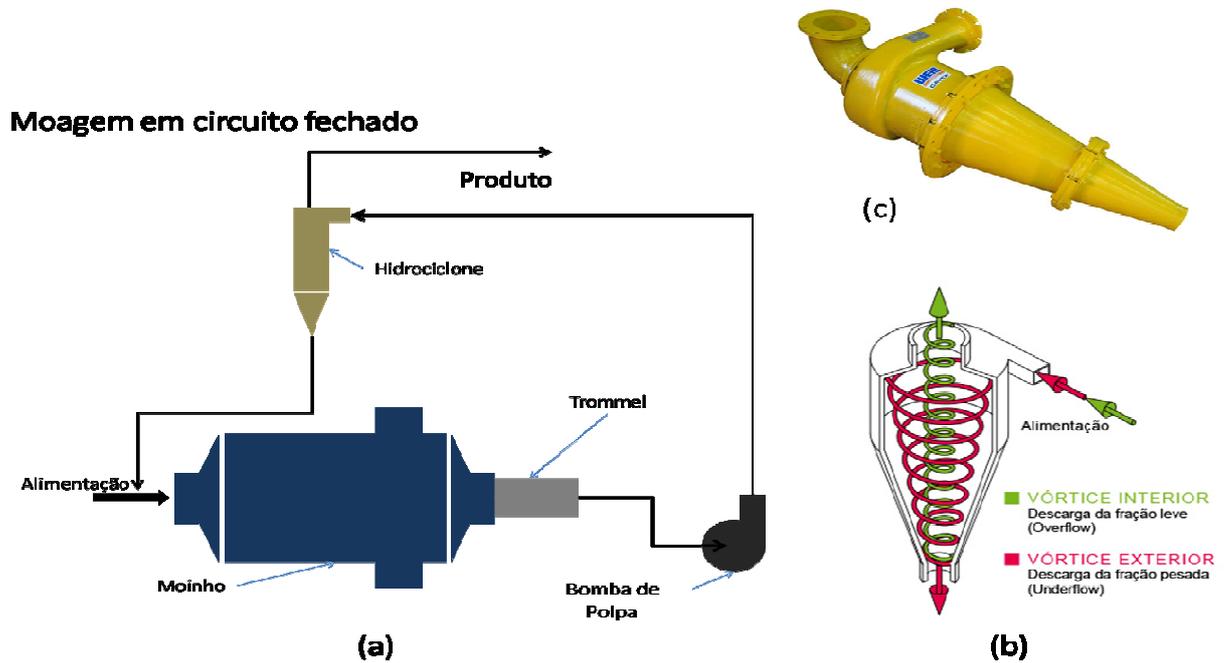
Figura 23: Moinhos Horizontal



Fonte: METSO MINERALS

Os moinhos podem ser operados em circuitos abertos, quando o material entra e já sai na granulométrica pretendida, este tipo de operação é pouco utilizado nas indústrias pois não permite um controle da distribuição do material e também por consumir muita energia. O tipo de operação mais utilizado é o fechado, que por meio de uma peneira classifica o material de granulométrica pretendida e o que não for volta ao moinho para ser reprocessado, pode se utilizar um sistema com bombas de poupa (próprias para mineração) com um hidrociclone ou classificadores para separar o material moído, ver Figura 24, (METSO MINERALS).

Figura 24: Moagem Fechado; a – Exemplo de circuito fechado do tipo reverso; b – funcionamento do hidrociclone; c- hidrociclone CAVEX ® WEIR.

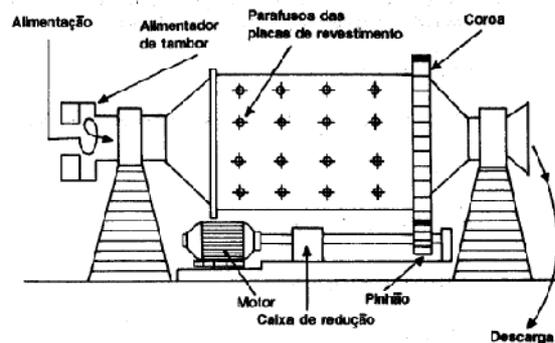


Fonte: a- Autor; b – AKW; c- CAVEX ® WEIR.

2.4.1 Moinhos Horizontais

Os moinhos horizontais são equipamentos cilíndricos montados na horizontal sob mancais. São constituídos de carcaça de ferro, revestida internamente com placas de aço ou borracha, que gira sobre mancais e contém no interior uma carga solta que é chamado de corpo moedor, pode ser barras, ou bolas de ferro ou aço endurecido, (Tratamento do minério, CETEM, 2004). Na Figura 25 é mostrado um moinho horizontal de corpo cilíndrico, destacando algumas suas partes principais.

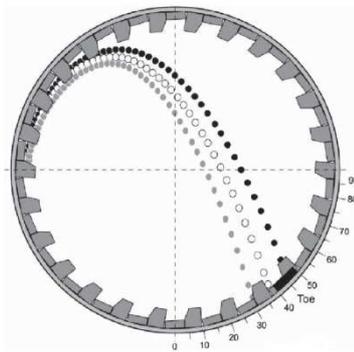
Figura 25: Moinho horizontal



Fonte: Tratamento do minério, CETEM, 2004

Estes corpos moedores são levados pelo próprio movimento da carcaça, até certo ponto que depois caem em formato parabólico. Estes corpos que são jogados caem por cima dos demais e do minério que fica entre os interstícios dos corpos moedores. A força centrífuga mantém os corpos em movimento circular, mas quando a força da gravidade fica maior do que a força centrífuga o corpo fica em trajetória parabólica. Na Figura 26 é mostrada uma simulação feita pela Metso da trajetória das bolas para diferentes tipos de revestimento de um moinho de bolas, (METSO MINERALS).

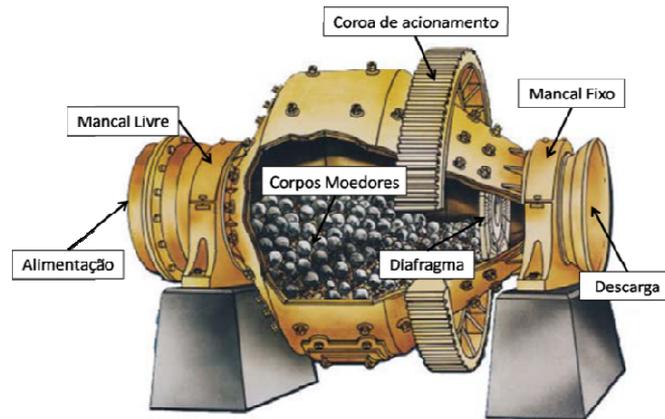
Figura 26: Simulação de lançamento de bolas.



Fonte: METSO MINERALS

Um moinho de barra ou bola geralmente são bem parecidos em sua fabricação e em componentes. Os moinhos de bolas são os mais utilizados pelas indústrias, eles são construídos de um corpo cilíndrico robusto principal que ao redor fica a engrenagem de acionamento do moinho (coroa), ela é acionada por meio de um eixo-pinhão que é acoplado a um motor principal de alta potência (segundo a Metso pode chegar a 20.000 HP). Este corpo é fechado por meio de duas tampas especiais, de um lado fica o chute de alimentação (spout feeder) e do outro a descarga que contém uma peneira (trommel) constituída de uma malha de aço que seleciona o material moído (pasta) de granulométrica específica e rejeita materiais não desejados como as próprias bolas desgastadas e outros elementos maiores indesejáveis para o processo, estas duas tampas são montadas em mancais de apoio, que devem ser lubrificados constantemente, ver Figura 27, (Moinhos de Bolas Metso, METSO, 2006).

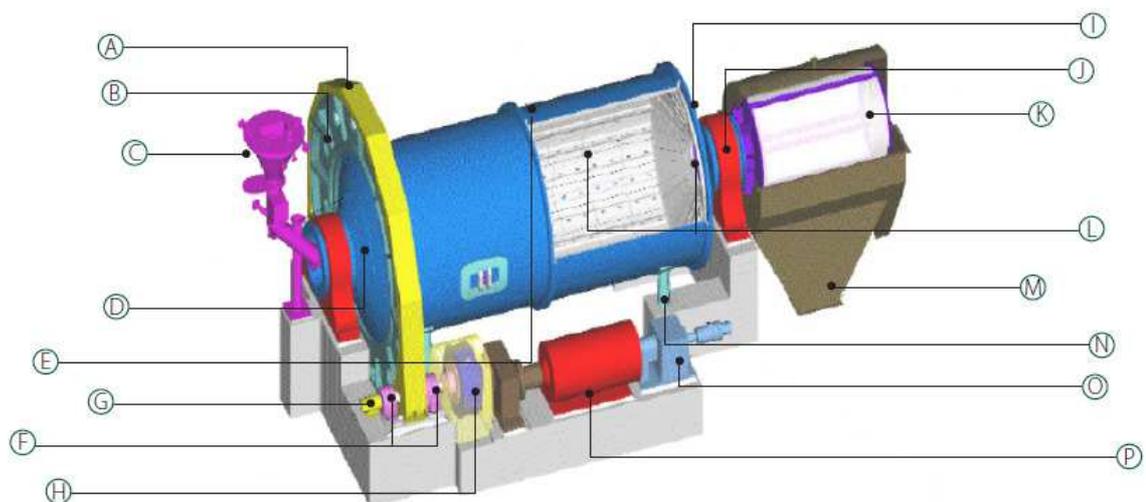
Figura 27: Moinho de Bolas



Fonte: METSO MINERALS

Internamente os moinhos são constituídos de placas que podem ser de borracha ou de aço, estas placas são chamadas de revestimentos (eles são aparafusados no corpo principal), e servem como material de sacrifício protegendo o corpo principal e também para reduzir o deslizamento da carga moedora, permitindo uma trajetória das bolas em forma de parábola, internamente ainda existe o diafragma uma espécie de grelha do tipo overflow (fluxo via transbordo de material) que permite somente a passagem da pasta moída e não dos corpos moedores, (Moinhos de Bolas Metso, METSO, 2006).

Figura 28: Componentes de um moinho horizontal



A- Proteção da engrenagem, B- Engrenagem, C- Alimentador spout, D- Tampa de alimentação, E - Corpo, F- Mancal eixo-pinhão, G- Eixo-pinhão, H- Acoplamento de alta rotação, I- Tampa de descarga, J- Mancal principal, K- Peneira Trommel, L- Conjunto do revestimento, M- Chute de descarga, N- Berço de levantamento, O- Acionamento auxiliar, P- Motor principal

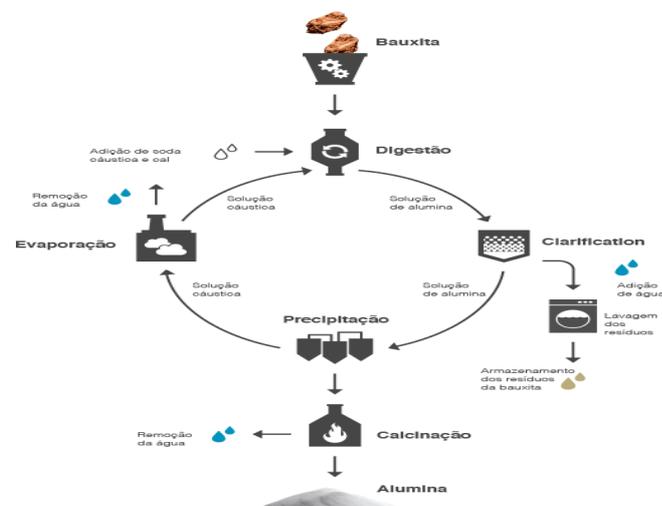
Fonte: Newsletter Metso para clientes de mineração, METSO MINERALS, 2012

2.4.2 A Moagem da Refinaria da ALUMAR

O processo químico utilizado na refinaria é processo Bayer, para produzir a alumina a partir de sua matéria prima principal, o minério de bauxita ou oxido de alumínio. Segundo Buchner (1989) o processo Bayer é o principal processo industrial de produção de alumina e foi desenvolvido por Karl Josef Bayer em 1888, que por sua vez é importante no processo Hall-Héroult de produção de alumínio.

No processo Bayer a bauxita é lavada com uma solução quente de hidróxido de sódio, NaOH, a 175°C, isto converte a bauxita em hidróxido de alumínio, $Al(OH)_3$, que se dissolve na solução, onde recebe o nome de digestão no processo, ou seja, ocorre uma lixiviação da alumina, depois a solução é decantada em tanques para posterior filtragem, e depois as impurezas são lavadas e recuperadas. Na purificação da solução é adicionado hidróxido de sódio em granulométricas médias para atuar como catalisador da reação, pois a reação ocorre espontaneamente, porém é lenta, e também para controlar o tamanho dos cristais que não podem ser pequenos, fazendo a solução retornar a alumina e o NaOH retirado e volte ao processo de lixiviação no inicio, sendo reaproveitando. A alumina ainda arrasta algumas percentagens de água então passa por um processo de calcinação onde será removido em um forno de alta temperatura o restante da água contida na alumina, após remoção da água e transformação da alumina propriamente dita, (BUCHNER, 1989).

Figura 29: Diagrama resumo do processo Bayer



Fonte: BUCHNER, 1989

Os moinhos são utilizados na refinaria para tornar quebrar as pedras de bauxita em pedaços de menor tamanho, para que possa haver uma solubilização com a solda caustica de forma mais eficiente, ou seja, aumentar a absorção do hidrato de alumina do minério. Na área responsável pela moagem da refinaria, os moinhos são divididos em três tipos, dois mais antigos que são do tipo barra-bola em um mesmo corpo principal, só que em compartimentos separados ficam as barras e o overflow passa para o compartimento de bolas.

Os moinhos mais novos da fábrica são de configuração deferente, dois do tipo somente barras onde seu produto passa para os do tipo bolas ou esferas, os moinhos de barras utilizam barras de aço super endurecidas utilizadas para uma moagem mais grosseira (podem quebrar pedras de até 4”), seu ciclo de moagem é do tipo aberto, ou seja o produto que sai do moinho é bombeado por bombas de polpa para os moinhos de bolas.

Os moinhos de bolas utilizam esferas de aço e cromo com uma dureza muito alta, para uma moagem mais refinada, e seu ciclo de moagem é do tipo fechado, por meio de um selecionador de material (hidrociclone), para separar os produtos que ainda não estão na granulométrica ideal, este que volta para o moinho. O overflow do hidrociclone leva produto para tanques de estocagem de pasta para ser utilizado nas unidade da digestão. A disposição geral da moagem nos moinhos é que o produto que sai dos moinhos de barras vai para os de bolas, isso permite uma moagem mais refinada e mais adequada para o processo químico de solubilidade da solução caustica reagir com a bauxita. No fim da área da moagem, a pasta (mistura de soda com bauxita) é transferida por meio de bombas de polpa para tanques de estocagem, que transfere para as unidades da digestão propriamente dita. Todos estes equipamentos citados, além de outros, sua manutenção é de responsável pela equipe de manutenção da digestão.

2.4.2.1 Dados técnicos: Sistema de acionamento dos moinhos

Na refinaria da ALUMAR há três tipos diferentes de moinhos, existem os do tipo barra-bola em um mesmo corpo principal, mas divididos separadamente são os equipamentos moinho 41 e moinho 51, os moinhos de barras que são responsáveis por uma moagem mais pesada, são os moinhos 21 e 31, ver o Quadro 2 sobre informações técnicas do sistema de acionamento destes equipamentos. O overflow dos moinhos de barras é transferido aos moinhos de bolas, que realizam uma moagem mais fina, são os equipamentos 22 e 31. Os moinhos são acionados por meio de um motor principal acoplado em um redutor principal e este é ligado no eixo pinhão de acionamento, os moinhos 41/51 são acionados por dois motores e os moinhos 21/31/22/32 são acionados por um motor, ainda existe um motor auxiliar para girar o moinho de forma lenta, mas somente é utilizado em manutenção do equipamento Figura 30 e Figura 31.

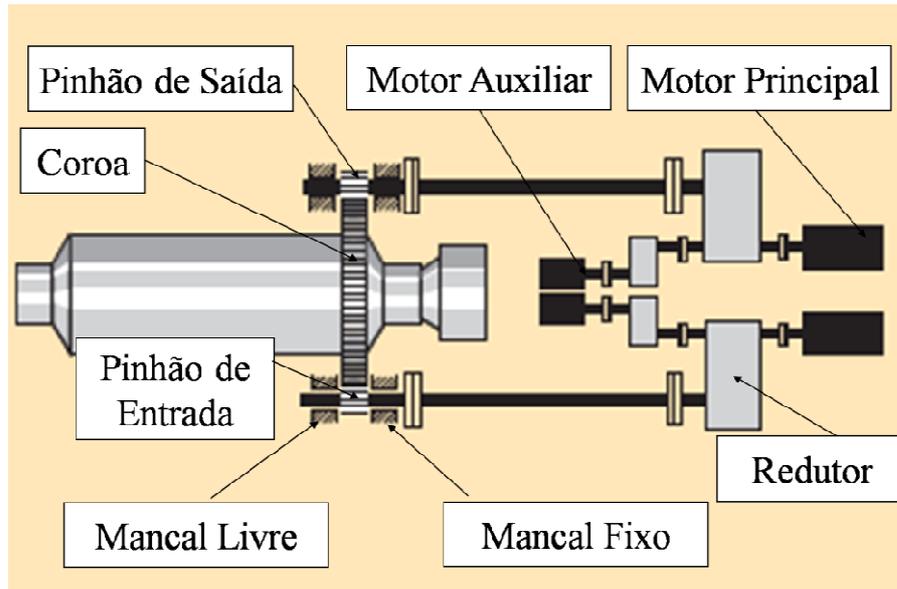
Quadro 2: Dados Técnicos moinhos de Barras

<u>Motor</u>		
Potência	3000	HP
Rotação Nominal	1191	RPM
<u>Redutor Principal</u>		
Relação	6,403:1	

<u>Coroa</u>		
Nº de Dentes	284	
Diâmetro Primitivo	7284,73	mm
Largura da Face	610	mm
<u>Eixo Pinhão</u>		
Nº de Dentes	21	
Comprimento do Eixo	2900	mm

Fonte: METSO MINERALS

Figura 30: Acionamento dos moinhos do moinhos 41 e 51



Fonte: La lubricación de grandes transmisiones de corona dentada, KULBER LUBRICATION

Para os moinhos 41 e 51, o acionamento é duplo, por meio de dois eixos pinhões de acionamento, os componentes destes equipamentos receberão nomes códigos para melhor entendimento e para facilitar a visualização dos dados nos testes posteriores, conforme o Quadro 3.

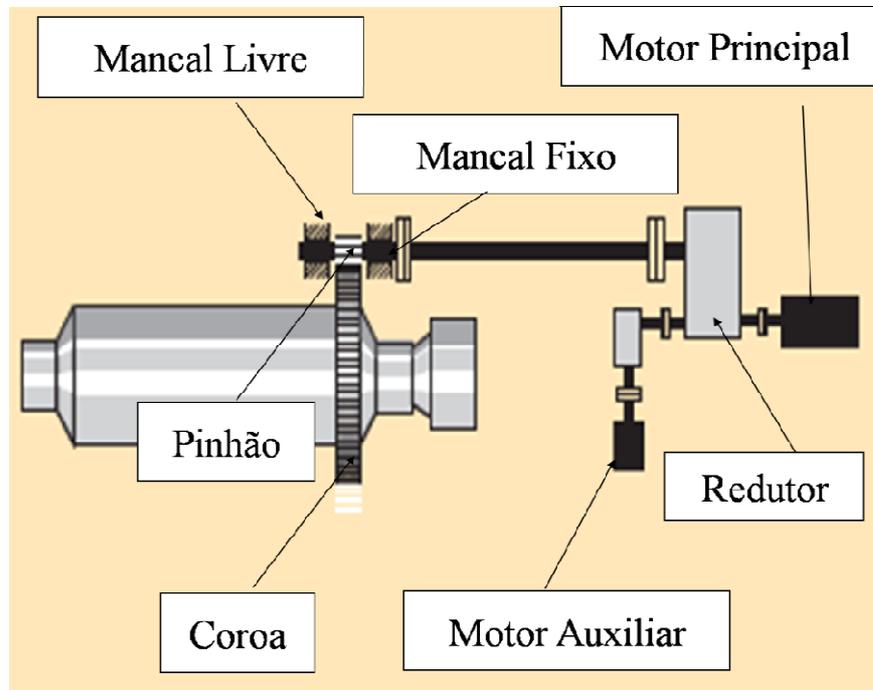
Quadro 3: Código dos nomes dos componentes de acionamento do moinho 41

Pinhão de Entrada	41PE
Mancal Fixo	41PEMF
Mancal Livre	41PEML
Pinhão de Saída	41PS
Mancal Fixo	41PSMF
Mancal Livre	41PSML
Coroa	41C

Fonte: Autor

O pinhão de entrada é o pinhão do primeiro acionamento, do motor principal, o pinhão de saída é o segundo acionamento, o mancal fixo é acoplado ao eixo redutor-motor, ele não deve sofrer desalinhamento o que poderia causar desgaste no pinhão ou no eixo de acionamento, o mancal livre é autocompensador, é ele que deve suportar todos os esforços devido ao desalinhamento, dilatação térmica e ajustes.

Figura 31: Acionamento dos moinhos21/31/22/32



Fonte: La lubricación de grandes transmisiones de corona dentada, KULBER LUBRICATION

Os moinhos novos da fábrica possuem um único motor de acionamento, e um único pinhão, assim como para o moinho 41, os componentes do moinho 31 receberão nomes códigos para facilitar a visualização dos dados posteriores, ver o Quadro 4.

Quadro 4: Código dos nomes dos componentes de acionamento do moinho 31

Pinhão	31P
Mancal Fixo	31PMF
Mancal Livre	31PML
Coroa	31C

Fonte: Autor

O moinho 31 tem um único acionamento e um único pinhão, o mancal fixo fica acoplado ao eixo do reductor –motor, funciona para não desalinhar, pois poderia danificar as engrenagens, o mancal livre tem a função ser autocompensador e suportar os desalinhamentos.

2.4.2.2 Lubrificação nos mancais dos moinhos

Os moinhos utilizados na mineração são equipamentos grandes, que precisam de alta potência para seu funcionamento. Como na maioria das máquinas ele precisa de lubrificação adequada para seu funcionamento, operação e para maior vida útil. Nos mancais principais de apoio é necessária uma lubrificação constante e que suporte as cargas e esforços do corpo do moinho, (Moinhos de Bolas Metso, METSO, 2006).

Segundo o Manual de Operação de Moinhos de bolas Metso, os dois mancais principais dos moinhos são similares em termos de funcionamento, o mancal que fica do lado do acionamento (coroa) é chamado de mancal fixo, e o mancal oposto é o mancal flutuante ou livre, mas ambos funcionam com lubrificação hidrodinâmica. O mancal flutuante funciona como um mancal autocompensador, suportando desalinhamentos e projetado para compensar a dilatação térmica do moinho (Figura 32). O mancal fixo é mais delicado e requer maior atenção, pois ele suporta a coroa de acionamento do equipamento, ele é chamado fixo, pois foi projetado para não sofrer desalinhamentos, pois caso isso ocorra pode danificar a coroa e comprometer o seu funcionamento (Figura 33).

Figura 32: Mancal Flutuante, moinho de barras, ALUMAR.

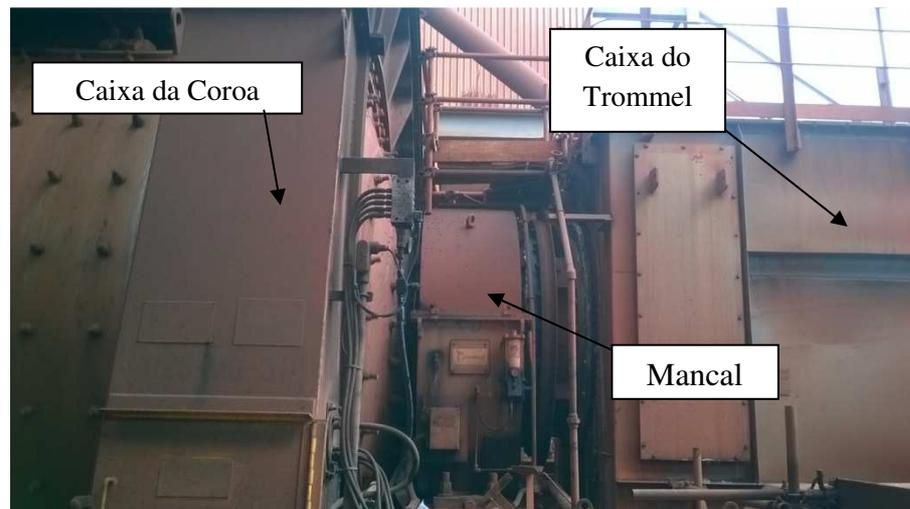


Fonte: Autor

Como o sistema de ambos os mancais funciona com lubrificação hidrodinâmica, ou seja o próprio óleo lubrificante faz a pressão suficiente para levantar o moinho o deixando ele girar livre, mas como se sabe, o efeito hidrodinâmico só funciona em altas rotações, então o moinho não pode ser acionado diretamente apoiado na parte inferior do mancal, pois iria

danificar permanentemente a superfície da bucha do mancal. Para contorna este problema a lubrificação dos mancais funciona por meio de uma unidade hidráulica centralizada, que possui bombas de alta pressão e bombas de baixa pressão. O sistema de lubrificação destes mancais é monitorado pelo PLC, pois dentro do mancal há sensores de temperatura do óleo, se este passar de 60°C o moinho desliga, pois o óleo perde sua viscosidade e pode perder o poder hidrodinâmico levando à falha nos mancais, (Moinhos de Bolas Metso, METSO, 2006).

Figura 33: Mancal fixo, moinho de barras, ALUMAR



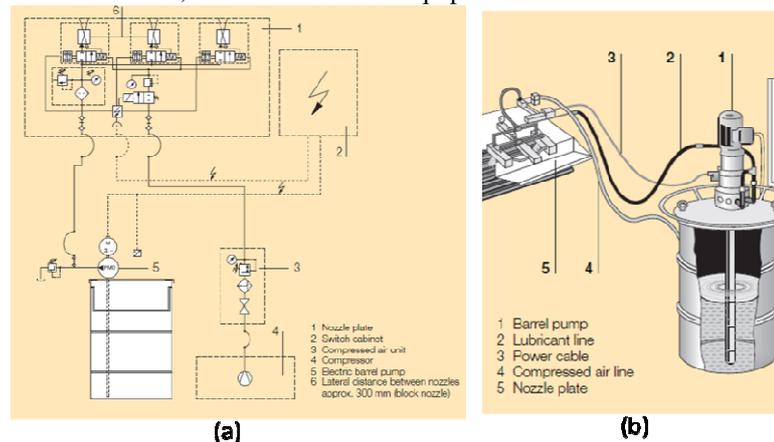
Fonte: Autor

A unidade hidráulica centralizada possui um sistema de circulação do óleo, um reservatório, filtros e um trocador de calor, além das bombas de alta e baixa pressão. Quando o moinho está parado todo óleo fica na parte superior do mancal, e o eixo fica em contato com parte inferior da bucha, assim para acionar o moinho, entra a bomba de alta pressão, que faz o equipamento levantar (não ter contato com a bucha), só depois que o moinho começa a girar e ganhar velocidade. Quando ele atinge a velocidade final, o efeito da lubrificação hidrodinâmica começa a funcionar, então sai a bomba de alta e entra a bomba de baixa pressão, que funciona somente para fazer circular o óleo. O lubrificante sai do mancal com temperatura alta, então ele passa pelo trocador de calor e vai para o reservatório, a bomba de baixa faz a sucção do óleo que ainda passa por um sistema de filtro antes de chegar novamente no mancal, fechando o circuito, (Moinhos de Bolas Metso, METSO, 2006).

2.4.2.3 Sistema de lubrificação das engrenagens de acionamento dos moinhos

A lubrificação das engrenagens de acionamento (coroa e pinhão) dos moinhos da requer muita atenção, pois como são engrenagens de grande porte e de alta potência, qualquer problema de lubrificação afetaria permanentemente o sistema. Estas engrenagens são lubrificadas por meio por um sistema automatizado com o lubrificante pulverizado, na Figura 34 vemos um exemplo de aplicação de sistema de lubrificação pulverizado.

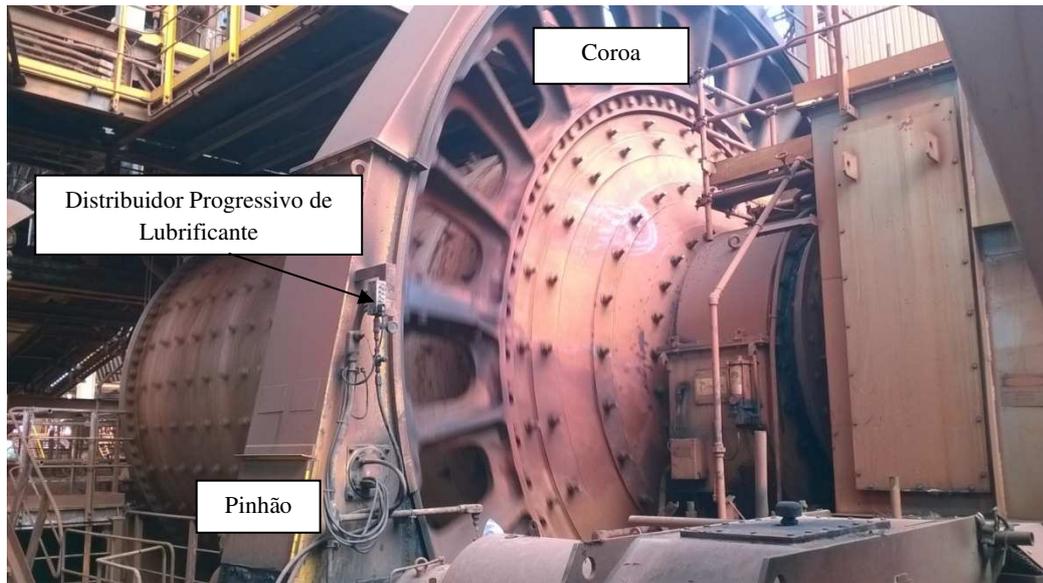
Figura 34: Exemplo de Sistema Pulverizado tipo WOERNER: a – diagrama de funcionamento; b – sistema com os equipamentos



Fonte: La lubricación de grandes transmisiones de corona dentada, KULBER LUBRICATION

A lubrificação do pinhão e da coroa (Figura 35) é por meio de spray de lubrificante pulverizado por meio de uma flauta com bicos de distribuição, todo o sistema funciona em uma rede de lubrificação centralizada automatizada controlado pelo PLC. A bomba de acionamento pneumático (modelo BOZZA) faz a sucção do lubrificante de um tambor (reservatório de 180 Kg) que descarrega a uma vazão de 25 g/s, que ainda passa por um distribuidor progressivo (modelo WOERNER, que possui um contador de pulsos), este faz a distribuição do lubrificante em quantidades iguais, cerca de 1 cm³ para cada bico da flauta de distribuição, o spray pulverizado que sai da flauta é formado do contato do lubrificante com a injeção de ar comprimido em alta pressão, assim fazendo lubrificar toda a área da largura da face da coroa e do pinhão.

Figura 35: Coroa de acionamento, moinho de barras, ALUMAR

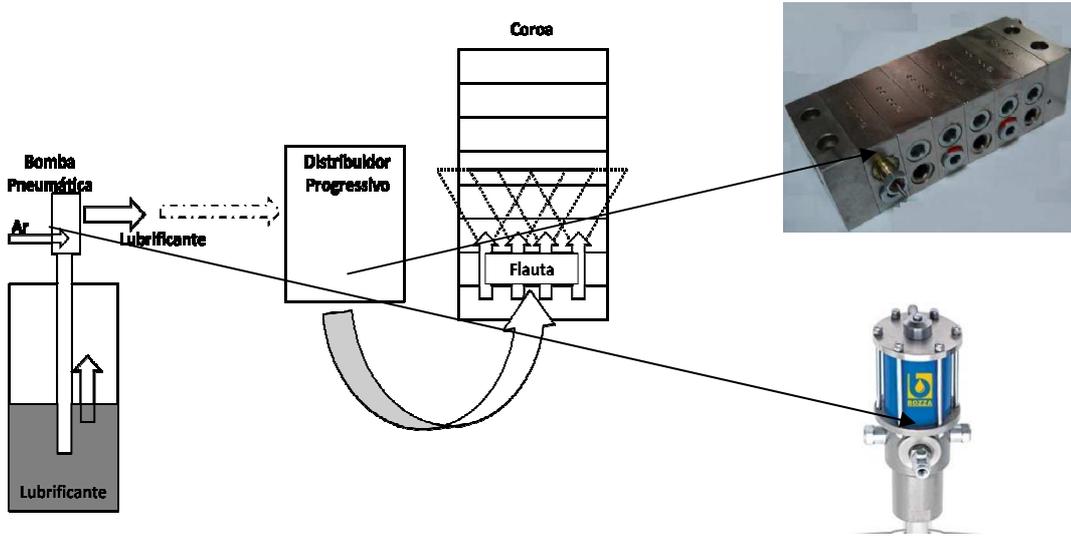


Fonte: Autor

O sistema de lubrificação das engrenagens de acionamento dos moinhos é todo controlado e monitorado por PLC e todos os equipamentos são acionados por ar comprimido em alta pressão. Se houver problemas na pressão de acionamento da bomba ou no ar da linha que forma o spray na flauta ou até mesmo na contagem de pulsos do distribuidor progressivo, alarmes serão enviados ao controle, e se persistirem com os alarmes ou se a pressão do ar cair demais, o sistema desliga, fazendo o moinho desligar, protegendo as engrenagens e todo o conjunto de acionamento, (ALUMAR).

O lubrificante pulverizado deve ser capaz de formar um filme ou película que deve aderir aos dentes das engrenagens e ser capaz de suportar as cargas envolvidas no engrenamento, o fluido também é capaz de retirar calor, pois devido ao contato das superfícies dos flancos dos dentes altos atritos são gerados, o que se não for eficiente pode levar ao desgaste ao longo de tempo. A disposição da flauta é de lubrificar a coroa, por definição de projeto, a lubrificação deve ser suficiente para lubrificar a coroa e o pinhão. Os bicos das flautas devem fazer um leque de lubrificante sobre a coroa, assim cobrindo toda a largura da engrenagem, ver Figura 36.

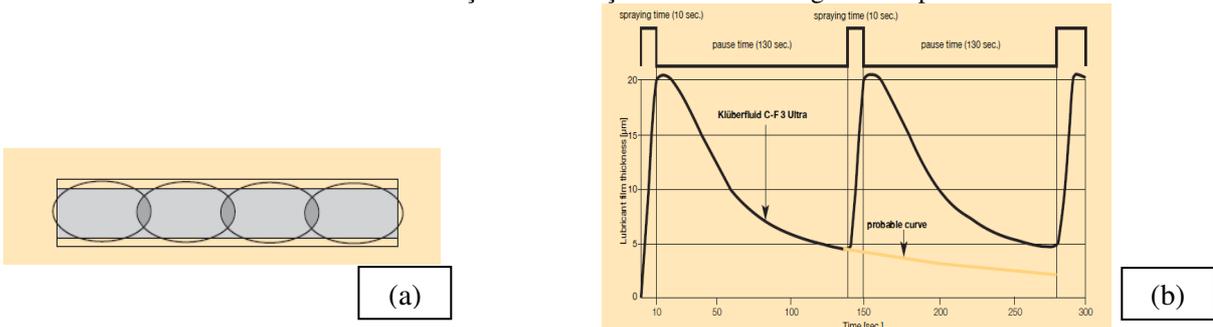
Figura 36: Diagrama do sistema de lubrificação da coroa e pinhão de acionamento dos moinhos ALUMAR e componentes principais.



Fonte: Autor

A Kluber recomenda que a disposição dos bicos da flauta devem esta adequadamente espaçados para que possa haver uma lubrificação adequada, para que todo o leque de lubrificação se sobreponha sobre a largura da engrenagem, assim lubrificando todos os dentes, na Figura 37.a é mostrado a forma ideal de formação do leque de lubrificação que saídos bicos pulverizadores.

Figura 37: Recomendações Kluber para lubrificação de engrenagens; a – Leque de spray lubrificante; b – Gráfico de ilustração de formação de filme ao longo do tempo.



Fonte: La lubricación de grandes transmisiones de corona dentada, KULBER LUBRICATION

A lubrificação deve ser capaz de formar um filme o suficiente para absorver a carga, reduzir o atrito, proteger as superfícies contra o desgaste, e transmitir calor de fricção, por isso ela teve ser intermitente e com certo intervalo de tempo, a Kluber recomenda que o sistema possa relubrificar as engrenagens no menor tempo possível (Figura 37.b), (La Lubrificacióm de Grandes Transmisiones de Corona Dentada, Kulber Lubrication, 1997).

Figura 38: Engrenagens do moinho, setas indicam o sentido de rotação.



Fonte: Autor

A Figura 38 mostra a disposição da flauta em relação à coroa, os bicos pulverizam o lubrificante na direção superior acedente da foto, devido o sentido de rotação da coroa (anti-horário) e do pinhão (horário), indicados pelas setas na foto, o lubrificante só terá contato com os dentes na mesma posição só que na revolução seguinte, assim o lubrificante deve ser capaz de aderir no dente da coroa e suportar a força centrífuga e a gravidade para lubrificar de forma eficiente.

3 MATERIAL E MÉTODOS

3.1 TESTES COM NOVO LUBRIFICANTE

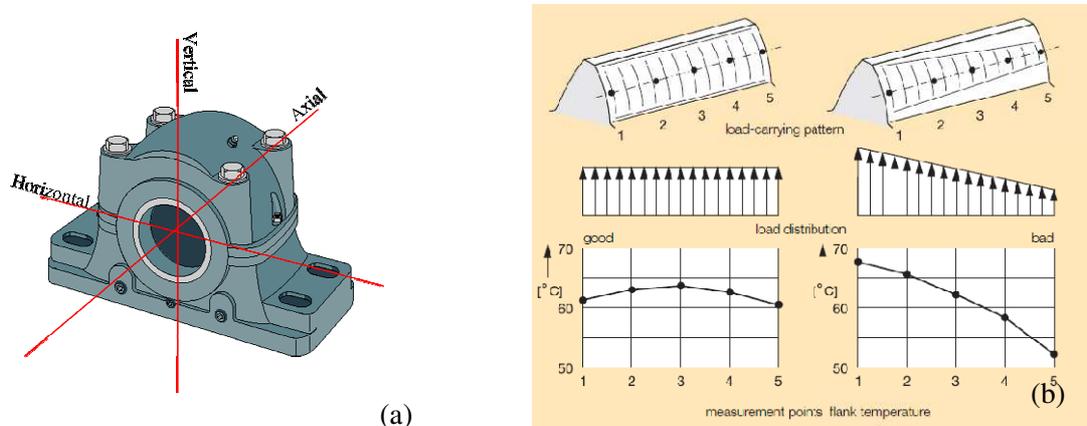
Anterior ao novo lubrificante, as engrenagens de acionamento dos moinhos eram lubrificadas por graxa asfáltica BEL REY Molyube SF-100, um único moinho possuía um consumo de 270 g/hora e o tambor reservatório (180 Kg) do lubrificante era consumido em aproximadamente 30 dias.

A proposta inicial da troca do lubrificante era de aumentar o tempo de consumo do tambor do lubrificante sem prejudicar a lubrificação das engrenagens. O óleo KLUBER C-F3 Ultra tem esta proposta, pois devido suas propriedades de aderência e por sua alta viscosidade, ele permaneceria no flanco dos dentes por mais tempo, assim aumentando o intervalo de pulverização do lubrificante. Após os testes terem sido liberados, uma equipe envolvendo a engenharia de manutenção, técnicos, operação, supervisão e representantes da Kluber, foi destacada para darem início aos testes. O moinho 41 (moinho do tipo barra-bola) foi selecionado para os primeiros testes, pois como é um moinho antigo, poderia pará-lo para a atividade. Depois os testes foram feitos no moinho 31, equipamento novo, do tipo barra.

Os testes foram seguidos conforme recomendações da Kluber Lubrication, a coleta dos dados de massa, temperatura e de vibração com a graxa asfáltica SF-100, no dia seguinte foi limpar todo o sistema e substituir o lubrificante, coletando assim nesta fase de transição de óleo Kluber com resquícios de graxa Bey Rey, colhendo a temperatura e vibração das engrenagens, e a última etapa foi coletar após um dia de uso direto com o novo lubrificante, o consumo de massa, temperatura e vibração. Para a coleta da vibração dos pinhões foi utilizado um analisador de vibração portátil para conferir as oscilações em todos os mancais nos eixo-pinhão, os eixos de orientações conforme recomenda o manual para manutenção preditiva em rolamentos está indicado na Figura 39.a. A coleta da temperatura foi feita em dois modos, primeiro foi feito a análise da temperatura dos mancais de apoio dos pinhão, e depois coletado a temperatura dos flancos dos dentes da coroa e pinhão, respectivamente, conforme recomendações da Kluber, cinco pontos específicos foram utilizados pois devido a distribuição da carga nas engrenagens, estas regiões são as mais

indicadas, ver Figura 39.b; os equipamentos utilizados nos testes estão ilustrados na Figura 40.

Figura 39: Orientações de medição: a – vibração; b –temperatura em função do carregamento no flanco do dente



Fonte: a-SKF; b - La lubricación de grandes transmisiones de corona dentada, KULBER LUBRICATION

Figura 40: Equipamentos utilizados nos testes de lubrificação óleo KLUBER C-F3: a – Analisador de vibração BearingChecker ® SPM; b – Pistola Termômetro IR Victor VC 307B ® FLUKER; c - Câmera termográfica i5 ® FLIR;



Fonte: b – btinstruments.pt; c - fluke.com; a - flir.com

3.1.1 Teste no moinho 41

O moinho 41 é do tipo barra-bola em um mesmo equipamento dividida em duas câmeras, a primeira é de barra e a segunda de bolas. O acionamento do moinho é por meio de dois motores e dois eixos-pinhão. O sistema de lubrificação pulverizado lubrificava somente a coroa, e esta lubrificava os dois pinhões. A coleta de dados (vibrações, temperatura, massa de lubrificante) aconteceu no mês de março/2015, e foi feito na coroa e em ambos os pinhões e nos mancais dos eixos de acionamento.

O teste durou uma semana, a primeira etapa foi limpar todo o sistema e depois janela de inspeção onde se tinha acesso ao pinhão de entrada, coroa e flauta com os bicos pulverizadores. O primeiro passo foi coletar a massa consumida com a graxa e depois com o óleo lubrificante isso com o moinho parado, depois coletar os níveis de vibração dos mancais dos dois pinhões e da temperatura dos dentes dos pinhões e da coroa, esta etapa foi necessário que o equipamento estivesse em funcionamento. A coleta da vibração dos mancais foi feita em etapa, coletando os dados com a graxa, período de transição e depois com o óleo *C-F3 Ultra*, para a coleta da temperatura foi utilizada mesma metodologia.

Quadro 5: Temperatura da coroa nos testes da troca do lubrificante Moinho 41

Temperatura Coroa Moinho 41 [°C]						
	Flanco dos Dentes					
Graxa	48	48	47	47	46	
Período Transição	50	49	49	49	49	
Óleo C-F3 Ultra 1ª amostra	50	49	49	48	48	
Óleo C-F3 Ultra2ª amostra	52	52	51	51	50	
Óleo C-F3 Ultra3ª amostra	47	47	46	45	44	

Fonte: Dados fornecidos pela Engenharia da Kluber

No Quadro 5 podemos ver os cinco pontos onde foi coletada a temperatura ao longo do flanco dos dentes da coroa em relação a cinco cenários, onde cada um foi coletado em dias seguidos ao longo do teste. Estes cinco pontos são muito importantes, pois é onde há a distribuição da carga de engrenamento na coroa, o mesmo vale para o pinhão, ver figura 40.b. Para o cenário da graxa, as temperaturas estavam estáveis, quando foi trocado para o óleo, no cenário de transição, a linha de distribuição do lubrificante ainda continha o lubrificante antigo, e assim houve uma mistura de ambos, e isso fez o aumento da temperatura. Com o passar dos dias e do teste, no último cenário já com o óleo *C-F3 Ultra*, podemos ver uma redução da temperatura em relação à graxa.

Quadro 6: Temperatura do pinhão de entrada nos testes da troca do lubrificante Moinho 41

Temperatura Pinhão de Entrada Moinho 41 [°C]							
	Mancal Livre	Mancal Fixo	Flanco dos Dentes				
Graxa	51	53	57	57	57	55	54
Período Transição	53	56	58	59	59	59	58
Óleo C-F3 Ultra1ª amostra	51	52	59	59	58	58	57
Óleo C-F3 Ultra2ª amostra	51	53	59	59	59	59	57
Óleo C-F3 Ultra3ª amostra	43	46	57	57	57	55	53

Fonte: Dados fornecidos pela Engenharia da Kluber

Para os cenários do pinhão de entrada no Quadro 6 aconteceu o mesmo que para a coroa, ou seja, no período de transição as linhas estavam sujas com graxa antiga, e a mistura com o óleo fez a temperatura aumentar, ou seja reduziu o poder do *C-F3 Ultra* de retirar calor dos dentes. Mas na última amostra a temperatura permaneceu bem similar à do cenário da graxa, este cenário pode ser explicado pelo motivo deste pinhão ser o último a ser lubrificado, pois como há o spray dos dentes da coroa e devido o sentido de rotação do moinho, primeiro a lubrificação do pinhão de saída e posterior a do pinhão de entrada. A temperatura dos mancais teve uma redução considerável de temperatura.

Quadro 7: Temperatura do pinhão de saída nos testes da troca do lubrificante Moinho 41

Temperatura Pinhão de Saída Moinho 41 [°C]							
	Mancal Livre	Mancal Fixo	Flanco dos Dentes				
Graxa	49	47	54	55	55	56	56
Período Transição	51	50	57	57	57	57	57
Óleo C-F3 Ultra1ª amostra	49	49	54	55	55	55	56
Óleo C-F3 Ultra2ª amostra	45	45	55	55	55	54	55
Óleo C-F3 Ultra3ª amostra	41	46	51	52	51	51	52

Fonte: Dados fornecidos pela Engenharia da Kluber

Já no pinhão de saída, no Quadro 7, ao longo dos dias e dos cenários podemos ver uma redução da temperatura, em alguns pontos de forma considerável. Devido o sentido de rotação este pinhão é o primeiro a ser lubrificado pela coroa, logo a redução da temperatura aconteceu primeiro, do que em relação ao do pinhão de entrada.

Os níveis de vibrações dos mancais do pinhão de entrada, mostrado no Quadro 8, foram guiados conforme as orientações da Figura 40.a. Para os cinco cenários podem ver uma redução das vibrações nos dois mancais e em todas as direções.

Quadro 8: Vibrações do pinhão de entrada nos testes da troca do lubrificante Moinho 41

Vibrações Pinhão de Entrada Moinho 41 [mm/s]						
	Mancal Livre			Mancal Fixo		
	Axial	Vertical	Horizontal	Axial	Vertical	Horizontal
Graxa	5.1	6.7	3.7	5.6	4.4	3.7
Período Transição	5.7	6.4	3.1	5.7	3.8	3.7
Óleo C-F3 Ultra1ª amostra	4.5	7.0	3.2	5.6	3.7	3.6
Óleo C-F3 Ultra2ª amostra	5.2	6.8	3.7	5.6	4.3	3.8
Óleo C-F3 Ultra3ª amostra	1.1	1	1.3	1.5	1.4	1.4

Fonte: Dados fornecidos pela Engenharia da Kluber

Quadro 9: Vibrações pinhão de saída nos testes da troca do lubrificante Moinho 41

Vibrações Pinhão de Saída Moinho 41 [mm/s]						
	Mancal Livre			Mancal Fixo		
	Axial	Vertical	Horizontal	Axial	Vertical	Horizontal
Graxa	1.6	1	1.2	1.2	1.2	1.5
Período Transição	1.8	0.7	1	1	1.2	1.3
Óleo C-F3 Ultra 1ª amostra	2.2	0.8	1.2	1.4	1.2	1.3
Óleo C-F3 Ultra 2ª amostra	1.9	0.8	1.1	1.1	1.2	1.2
Óleo C-F3 Ultra 3ª amostra	1.7	0.8	1	1	0.9	1.2

Fonte: Dados fornecidos pela Engenharia da Kluber

O mesmo cenário aconteceu para as vibrações dos mancais do pinhão de saída, mostrado no Quadro 9, houve uma redução da terceira amostra, com o óleo C-F3 Ultra, em relação à graxa. Alguns pontos houve aumento de vibração como no eixo axial do mancal livre, mas na maioria houve uma diminuição, estes resultados são significativos para reduzir a geração de desgaste por fadiga superficial nos flanco dos dentes das engrenagens dos dois pinhões.

3.1.2 Teste no moinho 31.

O moinho 31 é do tipo somente barras. Diferente do moinho 41, este equipamento possui somente um motor de acionamento e conseqüente somente um eixo-pinhão. Após a aprovação e conclusão dos testes anteriores, foi a provado os testes com o óleo C-F3 Ultra no moinho 31, assim toda a metodologia e toda a mudança utilizadas nos testes do moinho 41 foram utilizadas. Os testes ocorreram no mês de maio/2015, teve que ser de forma mais rápida quatro dias, pois este moinho é um equipamento muito importante para o processo, mas os testes ocorreram de forma satisfatória.

Quadro 10: Temperatura da coroa nos testes da troca do lubrificante Moinho 31

Temperatura Coroa Moinho 31 [°C]					
	Flanco dos Dentes				
	Graxa	41	41	41	41
Período Transição	36	36	36	36	35
Óleo C-F3 Ultra 1ª amostra	34	34	34	34	34

Fonte: Dados fornecidos pela Engenharia da Kluber

Seguindo os mesmos métodos aplicados ao moinho 41, para o moinho 31 foram coletados cinco pontos de temperatura de três amostras, ao longo dos dias do teste, apresentado no Quadro 10. Assim que foi substituída a graxa pelo óleo, foi considerável a redução da temperatura dos dentes da engrenagem.

Quadro 11: Temperatura do pinhão nos testes da troca do lubrificante Moinho 31

Temperatura Pinhão Moinho 31 [°C]							
	Mancal Livre	Mancal Fixo	Flanco dos Dentes				
Graxa	50	54	50	51	52	53	51
Período Transição	44	44	45	46	46	46	44
Óleo C-F3 Ultra 1ª amostra	45	46	43	44	44	45	44

Fonte: Dados fornecidos pela Engenharia da Kluber

A temperatura do pinhão do moinho 31, mostrado no Quadro 11, houve uma redução muito significativa, pois como só há um pinhão neste equipamento, esta engrenagem é que sofre mais com a temperatura, pois ela tem uma rotação muito maior. A temperatura nos mancais também reduziram, isso se deve a redução do pinhão.

Quadro 12: Vibrações nos mancais do pinhão Moinho 31

Vibrações Pinhão Moinho 31[mm/s]						
	Mancal Livre			Mancal Fixo		
	Axial	Vertical	Horizontal	Axial	Vertical	Horizontal
Graxa	1.2	0.8	1	1.5	1.1	1.2
Período Transição	1.1	0.8	1	1.3	0.8	1
Óleo C-F3 Ultra 1ª amostra	1	0.6	0.8	1.4	0.9	0.7

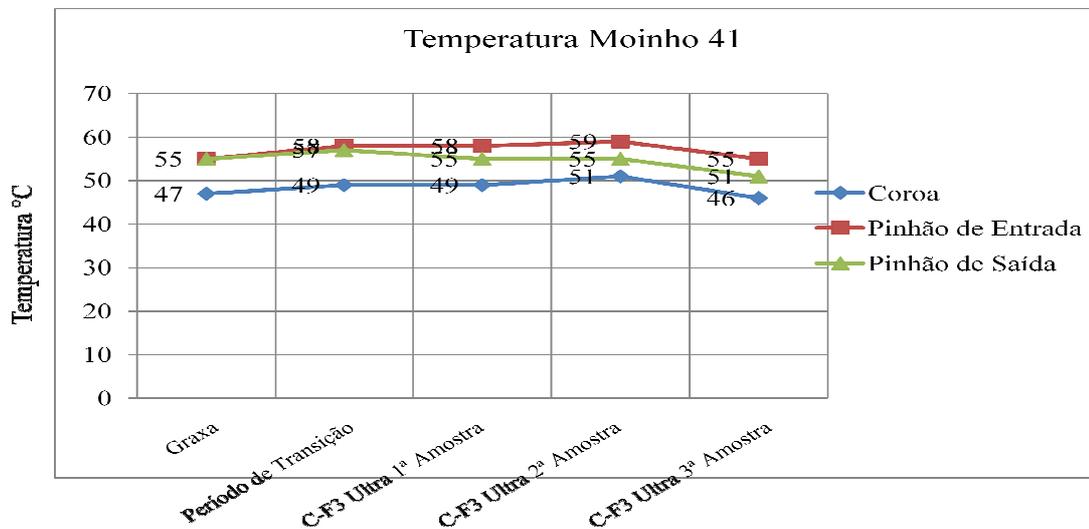
Fonte: Dados fornecidos pela Engenharia da Kluber

Os níveis de vibrações dos mancais do pinhão do moinho 31, conforme o Quadro 12 eram uma redução significativa em relação ao cenário da graxa, isso é excelente, pois diminui os choques e a possibilidade de desgaste por fadiga superficial dos flancos dos dentes da engrenagem, além da redução dos esforços nos rolamentos do mancal livre e fixo.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Para o moinho 41 houve uma pequena redução de temperatura nos flancos dos dentes das engrenagens, na média a temperatura teve uma redução significativa, muito próxima da usada com graxa asfáltica, mas estes valores ainda são bons tanto para a coroa quanto para os dois pinhões, conforme o gráfico na Figura 41 que apresenta a evolução da temperatura assim que os testes em cada etapa era realizado.

Figura 41: Gráfico da temperatura dos dentes das engrenagens Moinho 41



Fonte: Autor

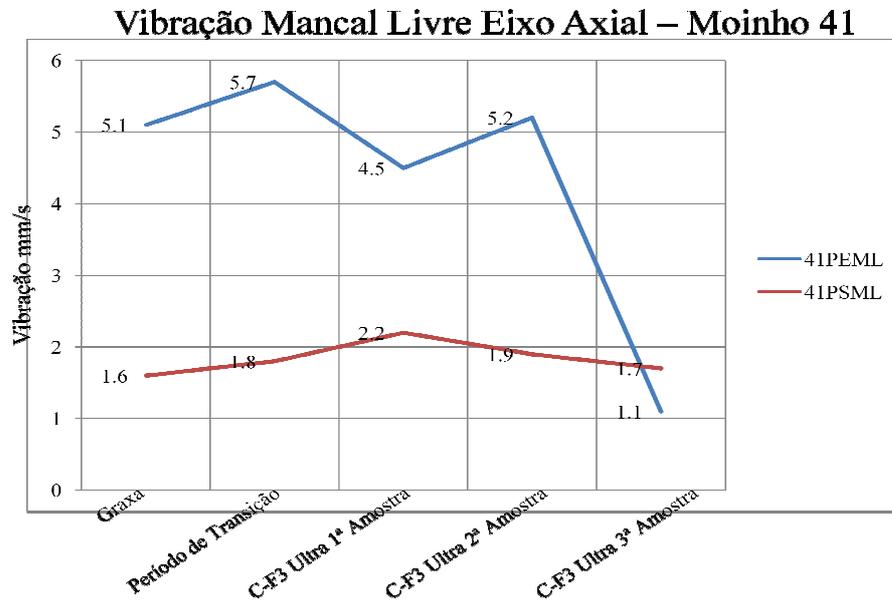
Após o uso do óleo C-F3 as vibrações nos mancais de apoio dos dois eixos do moinho 41 foram satisfatório, pois houve uma redução dos níveis de vibrações, o que é muito bom para o equipamento, no gráfico da figura 42 que mostram gráficos da evolução dos dados da vibração com a substituição do lubrificante. Nos mancais do pinhão de entrada, os resultados foram mais satisfatórios em relação ao de saída, pois apresentou uma considerável de redução, estes valores melhoram as condições de funcionamento da máquina e as condições de trabalho das engrenagens. Os nomes dos mancais foram simplificados para melhor visualização, conforme a Quadro 13, para mais informações ver Quadros 3 e 4.

Quadro 13: Código Nomenclatura dos mancais

Moinho 41		Moinho 31	
Pinhão de Entrada	41PE	Pinhão	31P
Mancal Fixo	41PEMF	Mancal Fixo	31PMF
Mancal Livre	41PEML	Mancal Livre	31PML
Pinhão de Saída	41PS	Coroa	31C
Mancal Fixo	41PSMF		
Mancal Livre	41PSML		
Coroa	41C		

Fonte: Autor

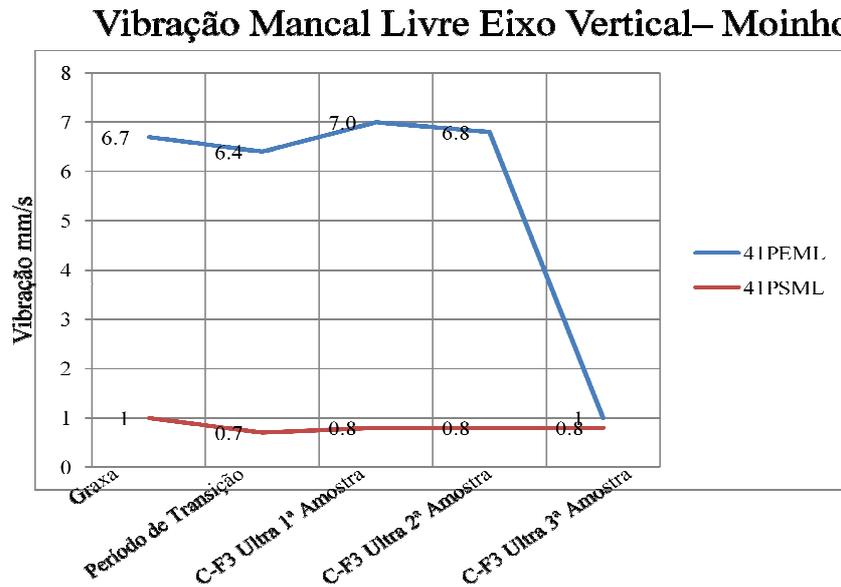
Figura 42: Gráfico das vibrações dos mancais livre eixo axial dos pinhões de entrada e de saída do moinho 41



Fonte: Autor

Na Figura 43 mostra a vibração do mancal livre no sentido axial, teve uma redução maior no pinhão de entrada.

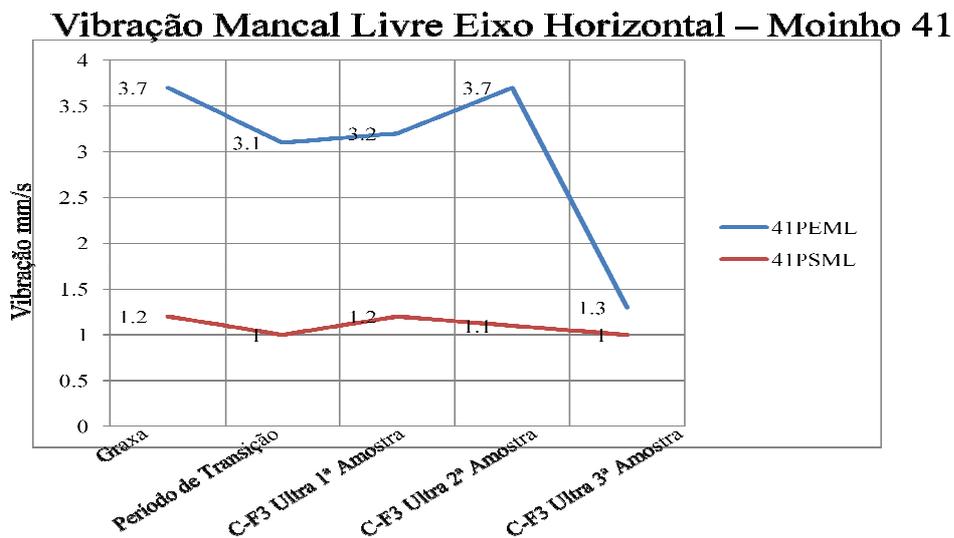
Figura 43: Gráfico das vibrações dos mancais livre eixo vertical dos pinhões de entrada e de saída do moinho 41



Fonte: Autor

A vibração no pinhão de entrada teve uma redução mais significativa do mancal livre do pinhão de entrada, no pinhão de saída houve uma redução discreta, conforme a Figura 44.

Figura 44: Gráfico das vibrações dos mancais livre eixo horizontal dos pinhões de entrada e de saída do moinho 41

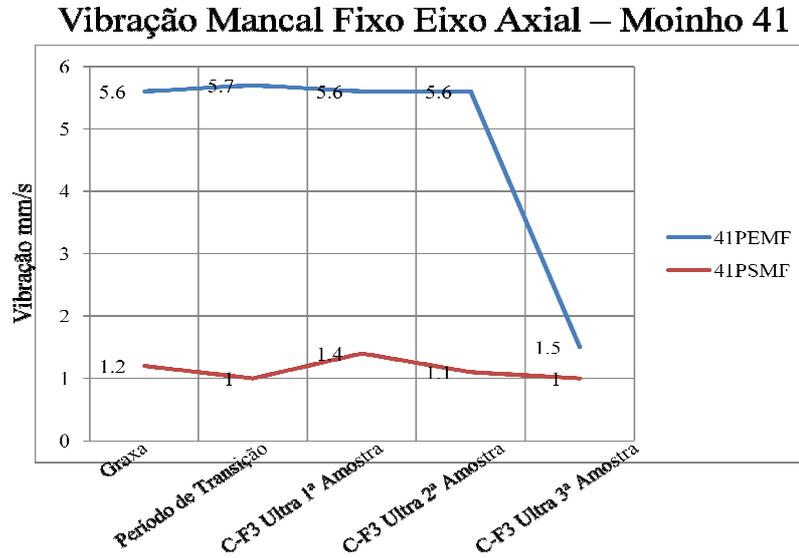


Fonte: Autor

Na Figura 45 vemos a vibração no mancal livre, no eixo horizontal, uma redução ocorreu nos dois pinhões, este resultado é muito bom, pois no sentido horizontal as folgas de

alinhamento horizontais são maiores o que poderia causar desgaste nos dentes das engrenagens.

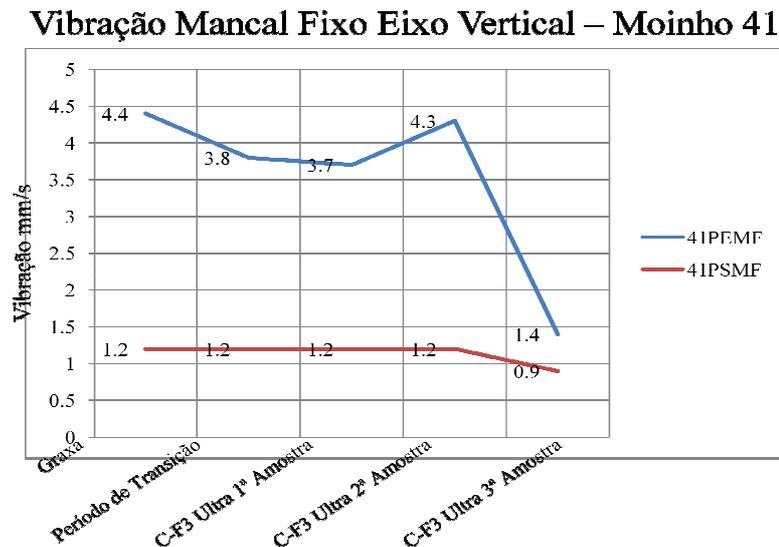
Figura 45: Gráfico das vibrações dos mancais fixos, eixo axial dos pinhões de entrada e de saída do moinho 41



Fonte: Autor

A Figura 46 mostra a vibração nos mancais fixos dois pinhões, ambos tiveram uma redução dos níveis, pois protege a engrenagem de desalinhamentos axiais do acoplamento, mas o mais significativo foi no eixo de entrada de acionamento da coroa do moinho 41.

Figura 46: Gráfico das vibrações dos mancais fixo eixo vertical dos pinhões de entrada e de saída do moinho 41

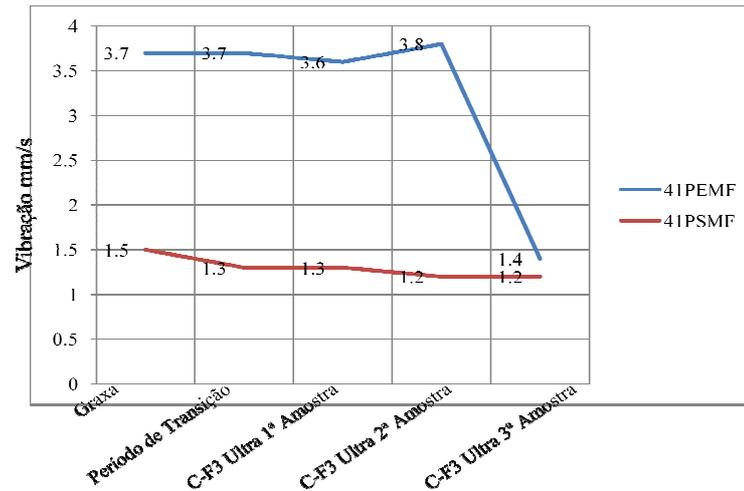


Fonte: Autor

No sentido vertical do mancal fixo, assim como no eixo axial a redução dos níveis de vibrações foram mais significativos no pinhão de entrada do que no pinhão de saída, como mostra a Figura 47.

Figura 47: Gráfico das vibrações dos mancais fixo eixo horizontal dos pinhões de entrada e de saída do moinho 41

Vibração Mancai Fixo Eixo Horizontal – Moinho 41



Fonte: Autor

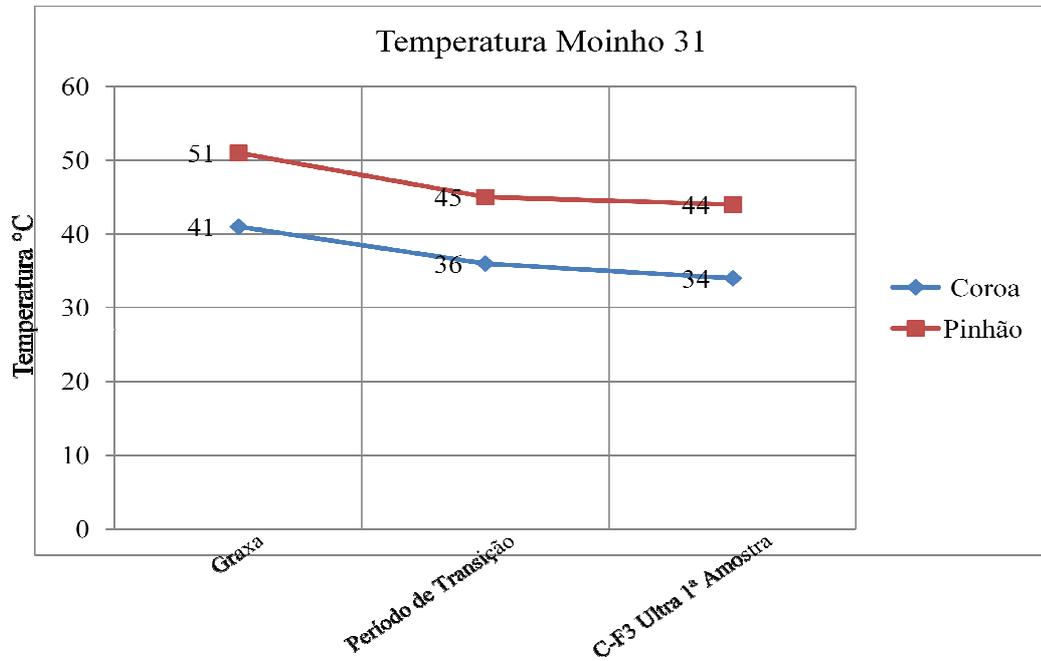
Assim como no mancal livre, o sentido horizontal houve uma redução mais expressiva no pinhão de entrada, isso reflete em uma proteção maior destes mancais, que não é projetado para suportar folgas e desalinhamentos, ver na Figura 48.

Nos testes com o novo lubrificante houve a oportunidade de verificar as condições do sistema e das engrenagens. A linha de ar estava apresentando vazamento, e este corrigido, o ângulo da flauta estava fora do recomendando, foi ajustado para garantir que os bicos lubrifiquem toda a largura da coroa.

Alguns desgastes pequenos foram encontrados nos flancos dos dentes da coroa e dos pinhões, além de pequenas riscagens leves e sulcos foram encontradas nos dentes dos pinhões, e fortes riscagens e marcas de escorregamentos nos flancos e pé dos dentes da coroa. Mas devido à idade do equipamento estes valores são de certo modo aceitáveis, sem prejudicar as engrenagens como um todo.

Para o moinho 31, como é um equipamento novo, os resultados foram mais expressivos, as engrenagens apresentavam melhores condições para os testes e em pouco tempo a redução da temperatura e da vibração ficou evidente.

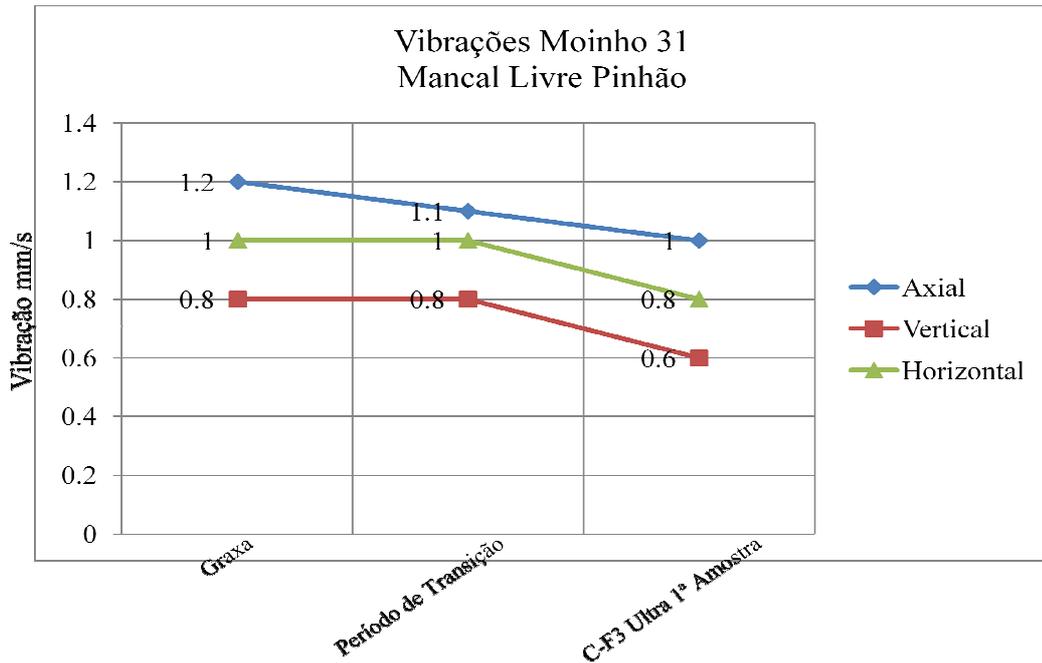
Figura 48: Gráfico das temperaturas dos dentes das engrenagens moinho 31



Fonte: Autor

Os resultados foram mais expressivos na temperatura, onde teve uma redução satisfatória em relação à graxa, isso se reflete na proteção do óleo e no fato dele ser ótimo para retirar calor dos dentes das engrenagens, conforme o gráfico na Figura 48.

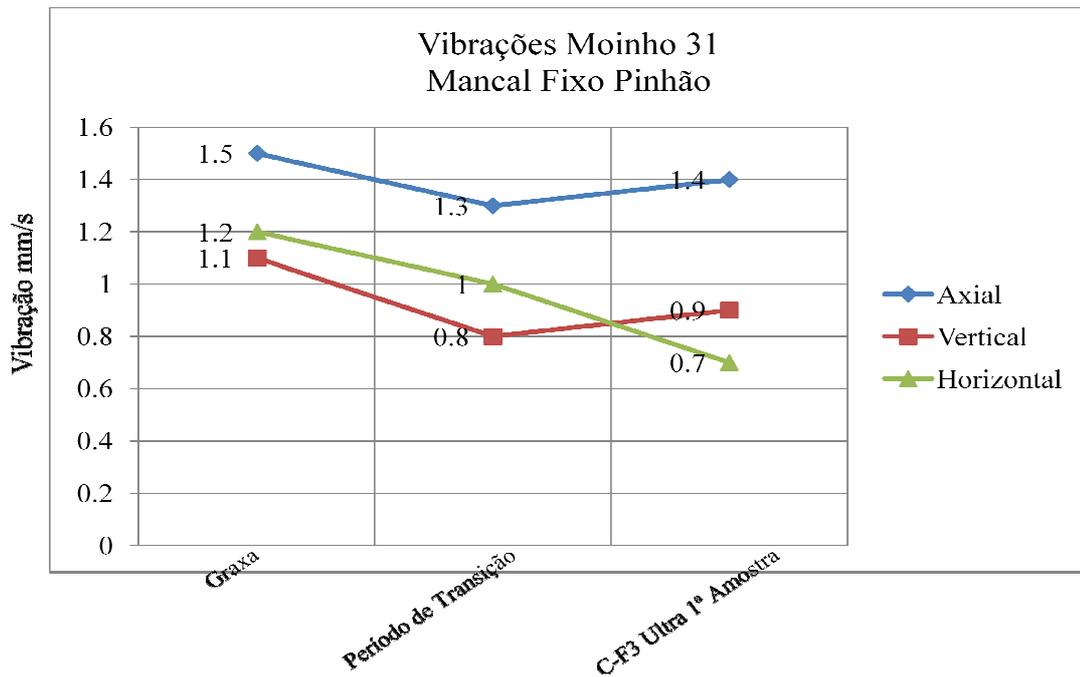
Figura 49: Gráfico das vibrações do mancal livre do pinhão do moinho 31



Fonte: Autor

Os níveis de vibração nos mancais do eixo pinhão também tiveram um bom desempenho, com o óleo C-F3 Ultra reduziu os níveis de vibração em ambos os mancais, ver gráficos na Figura 50. Esta redução nos níveis de vibrações reflete uma melhora na condição do equipamento, pois reduz os esforços e melhora o engrenamento, protegendo as engrenagens. No mancal fixo no eixo axial e vertical, houve um pequeno aumento em relação ao período de transição, pode ter sido causado pela presença da graxa ainda nas linhas do sistema de lubrificação, ver na Figura 50.

Figura 50: Gráfico das vibrações do mancal fixo do pinhão do moinho 31



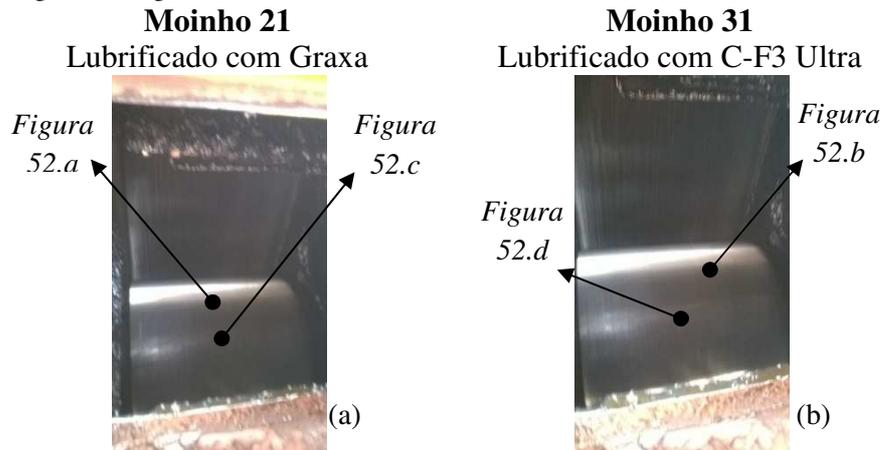
Fonte: Autor

Nos flancos dos dentes do pinhão foram encontradas marcas de sobre carga e concentração de carga na região central para a borda ao lado do mancal fixo e microriscagens, na coroa foram encontrados pequenos sinais de amassamento devido partículas solidas e microriscagens, também foi encontrado marcas de concentração de cargas. Uma inspeção na flauta dos bicos pulverizadores verificou que a angulação estava com leve erro de direção.

Para o moinho 31 foi realizado uma análise após quatro meses de utilização do óleo C-F3 Ultra, com o auxílio de uma câmera termográfica IR, foi feito uma comparação da temperatura do pinhão e coroa com as do moinho 21 que ainda utiliza graxa na lubrificação. O resultado comprovou que o óleo reduzir a temperatura das engrenagens, além de ser um ótimo lubrificante com ótimas propriedades como mais tempo de aderência aos dentes bem maior.

A Figura 51 apresenta fotos retirados do pinhão e da coroa em funcionamento para mostra exatamente o local que houve a coleta das temperaturas, isso tanto para o moinho 31 como para o moinho 21.

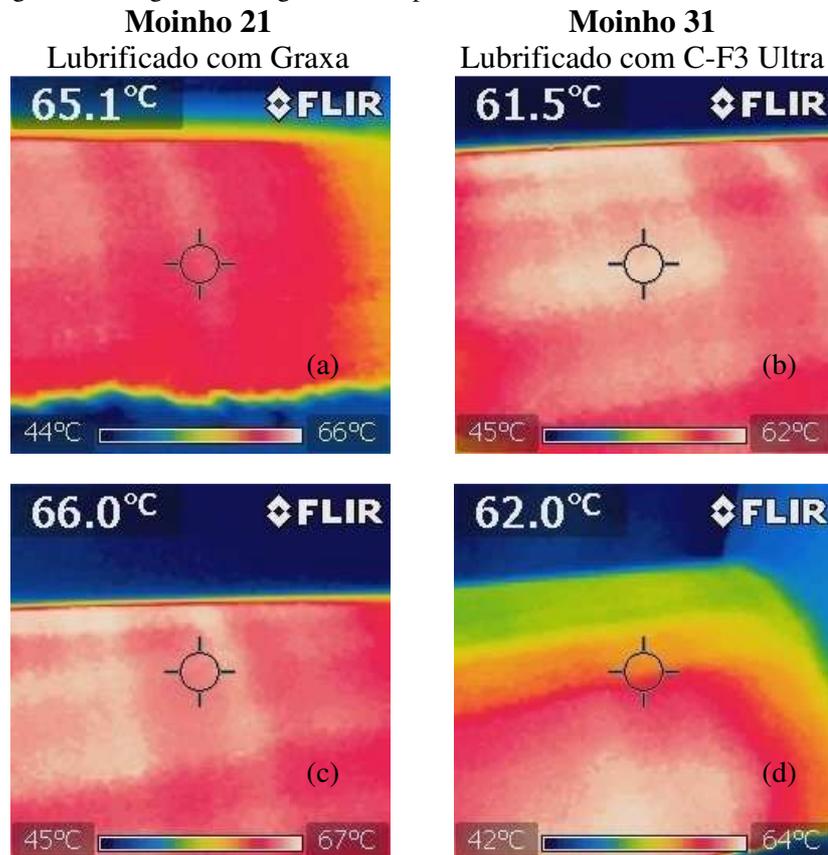
Figura 51: Fotos das engrenagens dos moinhos 31 e 21, apresentando os pontos das imagens termográficas.



Fonte: Autor

Nas imagens termográficas da Figura 52, apresenta as temperaturas dos pinhões do moinho 21 com as do moinho 31, pelos pontos apresentados, houve uma redução significativa da temperatura em torno de 7 °C após o uso do óleo C-F3 Ultra.

Figura 52: Imagens Termográficas dos pinhões dos moinhos 31 e 21



Fonte: Autor

Após a coleta dos dados, houve uma análise discussões com a engenharia de manutenção e os representantes da Klüber. Com os objetivos alcançados nos testes moinho 41 e depois no moinho 31, houve a necessidade de alteração no sistema de lubrificação, uma nova bomba foi utilizada, pois devido à alta viscosidade do óleo C-F3 Ultra, a bomba antiga não tinha capacidade de bombear o óleo, assim foi instalada uma bomba de maior potência, o sistema de controle *PLC* também teve que ser alterado, pois devido as propriedade de aderência do novo lubrificante, este consegue suportar mais carga e resistir por mais tempo nos dentes das engrenagens, assim a quantidade de pulsos e o intervalo destes pulsos teve que ser alterada, o resumo está no Quadro 14.

Quadro 14: Alterações no sistema de lubrificação centralizado das engrenagens

	Com Graxa	Nova Condição Klüberfluid C-F 3 Ultra:
Número de Pulsos	6 pulsos	3 pulsos
Tempo de Pausa	1.080 segundos	1.260 segundos
Consumo de Lubrificante	275 gramas/hora	120 gramas/hora

Fonte: Autor

Houve uma redução do consumo de forma expressiva, cenário anterior era de 275 g/h (198 Kg/mês), e passou para 120g/h (86.4 Kg/mês) com o uso do novo lubrificante, um tambor de lubrificante tem 180 Kg, com a graxa asfáltica SF-100 este tambor era consumido em um mês, após os testes e aplicação do C-F3 Ultra o consumo passou para dois meses.

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

O trabalho mostrou a importância da lubrificação em equipamentos de alta potência e de grandes carregamentos de alta potência como é caso das engrenagens de acionamento dos moinhos utilizados na mineração. Toda a metodologia dos testes da substituição do lubrificante foi seguida conforme normas e referências que a KLUBER recomenda. Depois dos testes nos equipamentos moinho 41 e moinho 31, a proposta foi de aplicar o novo lubrificante aos demais moinhos. A ALUMAR só vem a ganhar com a troca do lubrificante, pois no fim conseguiu-se reduzir os custos de material (tambor) que antes, com a graxa, um tambor durava 30 dias, após o uso do óleo C-F3 Ultrapassou para aproximadamente 60 dias, o consumo foi reduzido pela metade, isso só foi possível devido às propriedades deste óleo de altíssima viscosidade, que ainda trouxe benefícios às engrenagens e seu sistema de lubrificação centralizado. Todos os parâmetros como temperatura e vibração foram reduzidos para ambos os moinhos e este que era a proposta da lubrificação com o uso do óleo da Kluber.

A lubrificação com a graxa asfáltica SF-100 ainda é aplicada nos moinhos 21/22/32/51, mas após as conclusões das análises dos dados utilizados na fase dos testes, que foram altamente satisfatórios com redução da temperatura das engrenagens em 7° C e a redução dos níveis de vibrações, é certo aplicar o óleo C-F3 Ultra em todos os equipamentos, e por fim reduzir os custos e gastos com sobressalentes e demais equipamentos. Até agora não foi possível avaliar o valor de economia e redução dos custos com o novo óleo de forma concreta e válida, pois ainda está em fase de implementação e aprovação na área responsável pelas compras da fábrica, mas é certo dizer que tempo de uso de um tambor reservatório foi praticamente dobrado e isto reflete diretamente nos pedidos de novos tambores, e assim reduzindo os gastos no final.

REFERÊNCIAS

AHMED, Nehal S; NASSAR, Amal M. **Lubrication and Lubricants**. Intech, 2011.

BUCHNER, W.; SCHIELBS, R.; WINTER, G.; BUCHEL, K.H.. **Industrial Inorganic Chemistry**. New York: VCH Publishers, 1989.

BUDYNAS, Richard G.; NISBETT, J. Keith. **Elementos de Máquinas de Shigley: projeto de engenharia mecânica**. São Paulo, Mc-Graw-Hill, 2011.

CARRETEIRO, Ronald P; MOURA, Carlos R. S. **Lubrificantes e Lubrificação**. Rio de Janeiro: LTC Editora, 1975.

COLLINS, Jackie. **Projetos Mecânicos de Elementos de Máquinas**. Rio de Janeiro: LTC, 2012.

FELTRE, Ricardo. **Química Volume 3: Química Orgânica**. São Paulo: Moderna, 2004.

HAMROCK, Bernad J; SCHMID, Steven R; JACOBSON, Bo O. **Fundamentals of Fluid Film Lubrication**. New York: Marcel Dekker, 2004.

HOLWEGGER, Walter. **Fundamentals of Lubricants and Lubrification**. Intech, 2013.

KLUBER Lubrication: Klüberfluid® C-F 3 ULTRA. **Kluber Lubrication**, 2003.

LA LUBRIFICACIÓN de Grandes Transmisiones de Corona Dentada. **Kluber Lubrication**, 1997.

LUBRIFICANTES Especiais para a Indústria de Mineração. **Kluber Lubrication**, 2012.

MANUAL de Tecnologia Automotiva. **BOSCH**, 2005

MOINHOS de Bolas Metso. **Metso Minerals Do Brasil**, 2006.

MOTT, Robert L. **Elementos de Máquinas em Projetos Mecânicos**. São Paulo: Pearson, 2015.

MUNSON, Bruce R.; YOUNG, Donald F.; OKIISHI, Theodore H. **Fundamentos da Mecânica dos Fluidos**. São Paulo: Blucher, 2004.

NIEMANN, Gustav. **Elementos de Máquinas**. São Paulo: Blucher, 1971.

NORTON, Robert L. **Projetos de Máquinas: uma abordagem integrada**. São Paulo: Bookman, 2013.

SILVA, Gustavo. **Newsletter Metso para clientes de mineração**. METSO MINERALS do Brasil, 2012.

TRATAMENTO de Minerios. **CETEM- Centro de Tecnologia Mineral**, 2004.

UNIVERSIDADE ESTADUAL DO RIO DE JANEIRO. **Curso de Controladores Lógicos Programáveis**. Rio de Janeiro, 2010.

Notícia BBC. Resuelven el misterio de cómo construyeron las pirámides de Egipto. Disponível em:

<http://www.bbc.com/mundo/noticias/2014/05/140501_ciencia_construccion_piramides_egipto_arena_humeda_np>. Acesso em novembro de 2015.

BOZZA. Historia da Lubrificação. Disponível em: <<http://www.bozza.com/institucional/historia>>. Acesso em setembro de 2015.

SKF. EasyRail High Pressure. Disponível em: <<http://www.skf.com/br/products/lubrication-solutions/lubrication-systems/lubrication-systems-for-special-applications/skf-easyrail/skf-easyrail-high-pressure/index.html>>. Acesso em novembro de 2015.

ANEXOS

TERMO DE CONSENTIMENTO LIVRE E ESCLARECIDO

Eu, Rafael Joaquim Bacelar, responsável pelo setor de Manutenção do Retro Porto/Refinaria da empresa ALUMAR, com sede em BR-135 KM18, São Luis-MA, por meio deste, declaro que autorizo e autorizei a realização da pesquisa acadêmica: *Estudo de Caso em Lubrificação de Engrenagens de Acionamento de Moinhos de Mineração*, pelo estudante ANTÔNIO VINICIUS GARCIA CAMPOS, graduando no curso de Engenharia Mecânica da Universidade Estadual do Maranhão – UEMA, e também estagiário da empresa ALUMAR, no âmbito do setor de Manutenção do Retro Porto.

Declaro ainda, que estou de acordo com a realização do estudo de campo operado no setor de Manutenção do Retro-Porto em razão da pesquisa supramencionada, bem como com a realização das intervenções necessárias decorrentes da pesquisa e a consequente colheita de dados necessários à confecção do trabalho. Por fim, autorizo a divulgação pública dos resultados desta pesquisa – respeitados sigilo e propriedade industriais – e entendo que os mesmos não serão usados para fins lucrativos.

Reafirmo, portanto, o livre e esclarecido consentimento que forneci à realização da atividade.

Nesses termos,

Subscribo-me.

São Luis 15 de DEZEMBRO de 2015


 Rafael Joaquim Bacelar
 Supervisor de Manutenção do Retro Porto

ANEXO B – KLUBERFLUID® C-F3 ULTRA; KLUBER LUBRICATION

Product information



Klüberfluid C-F 3 Ultra

Operational lubricant for large girth gear drives



Benefits for your application

- Operational lubricant for open gear drives with immersion, circulation or spray lubrication systems
- For normal to elevated component temperatures
- Free from heavy metals, chlorine, solvents, bitumen and solid particles
- Easy application
- High wear and tooth flank protection
- Reduced maintenance, lower disposal costs
- Light-coloured, transparent product

Description

Klüberfluid C-F 3 ULTRA is a lubricant of a new generation, developed specifically for the lubrication of medium-size to large girth gear drives. It is based on synthetic hydrocarbons and mineral oil. It provides good adhesion, excellent resistance to high pressure and protection against wear. This product is suitable for use at component temperatures up to 120°C.

Klüberfluid C-F 3 ULTRA is free from bitumen, solvents, heavy metals, chlorine and solid particles.

Klüberfluid C-F 3 ULTRA meets the requirements of ANSI/AGMA 9005-E02 annex D-2.

Application

Klüberfluid C-F 3 ULTRA can be used for immersion, paddle wheel, circulation and spray lubrication of large girth gear drives. Application possibilities are not restricted, neither by gear sizes nor power ratings. A peripheral speed of 10.0 m/s should not be exceeded.

Such drives are found in rotary kilns, tube mills, drums and similar machinery used in the cement, lime, gypsum, mining and

chemical industries and in power plants. Further applications are found in sugar and paper production as well as in marine and offshore technology.

Application notes

When applied by immersion, Klüberfluid C-F 3 ULTRA is directly transferred to the tooth flanks. You can also use the Klübermatic PA circulation lubrication system to force-pump the lubricant onto the tooth flanks.

Klüberfluid C-F 3 ULTRA can also be applied via customary spray systems.

The lubricant film on the tooth flanks can be made visible by means of a UV lamp of at least 366 nm.

Material safety data sheets

Material safety data sheets can be requested via our website www.klueber.com. You may also obtain them through your contact person at Klüber Lubrication.

Pack sizes	Klüberfluid C-F 3 Ultra
Bucket 25 kg	+
Bucket 50 kg	+
Drum 180 kg	+

Klüberfluid C-F 3 Ultra

Operational lubricant for large girth gear drives



Benefits for your application

- Operational lubricant for open gear drives with immersion, circulation or spray lubrication systems
- For normal to elevated component temperatures
- Free from heavy metals, chlorine, solvents, bitumen and solid particles
- Easy application
- High wear and tooth flank protection
- Reduced maintenance, lower disposal costs
- Light-coloured, transparent product

Description

Klüberfluid C-F 3 ULTRA is a lubricant of a new generation, developed specifically for the lubrication of medium-size to large girth gear drives. It is based on synthetic hydrocarbons and mineral oil. It provides good adhesion, excellent resistance to high pressure and protection against wear. This product is suitable for use at component temperatures up to 120°C.

Klüberfluid C-F 3 ULTRA is free from bitumen, solvents, heavy metals, chlorine and solid particles.

Klüberfluid C-F 3 ULTRA meets the requirements of ANSI/AGMA 9005-E02 annex D-2.

Application

Klüberfluid C-F 3 ULTRA can be used for immersion, paddle wheel, circulation and spray lubrication of large girth gear drives. Application possibilities are not restricted, neither by gear sizes nor power ratings. A peripheral speed of 10.0 m/s should not be exceeded.

Such drives are found in rotary kilns, tube mills, drums and similar machinery used in the cement, lime, gypsum, mining and

chemical industries and in power plants. Further applications are found in sugar and paper production as well as in marine and offshore technology.

Application notes

When applied by immersion, Klüberfluid C-F 3 ULTRA is directly transferred to the tooth flanks. You can also use the Klübermatic PA circulation lubrication system to force-pump the lubricant onto the tooth flanks.

Klüberfluid C-F 3 ULTRA can also be applied via customary spray systems.

The lubricant film on the tooth flanks can be made visible by means of a UV lamp of at least 366 nm.

Material safety data sheets

Material safety data sheets can be requested via our website www.klueber.com. You may also obtain them through your contact person at Klüber Lubrication.

Pack sizes	Klüberfluid C-F 3 Ultra
Bucket 25 kg	+
Bucket 50 kg	+
Drum 180 kg	+

ANEXO C – MOLYLUBE[®] SF 100; BEL RAY

PRODUCT DATA SHEET



MOLYLUBE[®] SF 100 SEMI-SYNTHETIC OPEN GEAR LUBRICANT

Molylube SF 100 Semi-Synthetic Open Gear Lubricant, commonly known as Molylube SF 100, is an extremely versatile, multi-service and environmentally friendly lubricant. Molylube SF 100 Semi-synthetic Open Gear Lubricant is a semi-synthetic base and aluminum complex thickener, Molylube SF 100 Semi-Synthetic Open Gear Lubricant provides excellent Extreme Pressure, anti-wear and rust and corrosion protection under the tough conditions associated with mining and heavy industry. Molylube SF 100 Semi-Synthetic Open Gear Lubricant is superior mining lubricant. In field evaluations Molylube SF 100 Semi-Synthetic Open Gear Lubricant has been shown to have a cost-of-ownership up to 35% lower than the competition when purchase price, lubricant consumption and component life extension is considered.

Applications

- ◆ Draglines and shovels – open gears, bushings, rollers and rails, dipper sticks and handles, low to moderate speed anti-friction bearings, low speed enclosed gear cases and some propel mechanisms
- ◆ Mills and kilns – open gears
- ◆ General industrial open gears, pins and bushings and sliding surfaces

Features and Benefits

- | | |
|--|---|
| ◆ Multi-service capabilities | Can be used in a wide range of applications ranging from open gears to low-moderate speed anti-friction bearings and enclosed gear cases. |
| ◆ Reduced consumption | Lower lubrication costs, minimizes clean-up and disposal costs. |
| ◆ Outstanding anti-wear properties | Extends component life, greatly reducing operating costs. |
| ◆ Outstanding mobility and pumpability | A grade to lubricate through the temperature extremes from the Arctic to the Sahara. |

General Description

Molylube SF 100 Semi-synthetic Open Gear Lubricant is an extremely versatile, multi-service and environmentally friendly lubricant. Molylube SF 100 Semi-synthetic Open Gear Lubricant is designed for use on draglines, shovels, mills, kilns and many heavy industrial applications.

Product No. 77070, 77020, 76850, 76990, 77010, 77000

Page 1 of 2

1/3/2012

With continual research and development, Bel-Ray Company, Inc. reserves the right to change the information contained herein. The Company is not responsible for misuse or misapplication of its products.

Bel-Ray Company, Inc. • P.O. Box 526 • Farmingdale, NJ 07727 USA
TEL +1 732-938-2421 • FAX +1 732-938-4232 • www.belray.com

MOLYLUBE® SF 100 SEMI-SYNTHETIC OPEN GEAR LUBRICANT

TYPICAL PROPERTIES

<u>Product No.</u>	<u>77070</u>	<u>77020</u>	<u>76850</u>	<u>76990</u>	<u>77010</u>	<u>77000</u>
Bel-Ray Name Grade	Sub-Arctic	Arctic	Low Temp	Light	Medium	Heavy
Penetration, unworked, ASTM D217 mm/10 (pre-dilution)	370	370	370	370	370	420
Apparent Viscosity (Brookfield), ASTM D2983 mod. @ 25°C (77°F), cP	11,000	20,000	n/a	20,000	n/a	11,000
Thickener Type	aluminum complex	aluminum complex	aluminum complex	aluminum complex	aluminum complex	aluminum complex
Viscosity (Base Fluid), ASTM D445 @ 40°C, cSt	707	707	707	1860	1860	3675
@ 100°C, cSt	40	40	40	77.2	77.2	144.7
Viscosity, (Base Fluid), ASTM D2161 @ 100°F, SUS	3,821	3,821	3821	10,210	10,210	20,157
@ 210°F, SUS	188	188	188	375	375	705
Copper Strip Corrosion, ASTM D4048 24 hrs @ 100°C, rating	2a	2a	2a	2a	2a	2a
4-Ball EP Test, ASTM D2596 Weld Load, kg	≥800	≥800	≥800	≥800	≥800	≥800
Load Wear Index, kg	160	160	160	160	160	160
Useful Temperature Range °C	-45 to +10	≥-35	≥-18	≥-28	≥0	≥-15
(°F)	(-49 to +50)	(≥-31)	(0)	(≥-18)	(≥32)	(≥5)
Color	Black	Black	Black	Black	Black	Black