

**UNIVERSIDADE FEDERAL DA PARAÍBA
CENTRO DE TECNOLOGIA
CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA**

REBECCA MALZAC PONTES

**ANÁLISE QUANTITATIVA DE DESGASTE EM UM MOINHO
VERTICAL DE ROLOS: UM ESTUDO DE CASO**

JOÃO PESSOA/PB

2018

REBECCA MALZAC PONTES

**ANÁLISE QUANTITATIVA DE DESGASTE EM UM MOINHO
VERTICAL DE ROLOS: UM ESTUDO DE CASO**

Trabalho de Conclusão de Curso submetido ao Curso de Graduação em Engenharia Mecânica como requisito parcial para obtenção do título de Bacharel em Engenharia Mecânica.

Orientador: Dr. José Hilton Ferreira da Silva

JOÃO PESSOA/PB

2018

Catálogo na publicação
Seção de Catalogação e Classificação

P813a Pontes, Rebecca Malzac.

ANÁLISE QUANTITATIVA DE DESGASTE EM UM MOINHO VERTICAL
DE ROLOS: UM ESTUDO DE CASO / Rebecca Malzac Pontes. -
João Pessoa, 2018.
48 f.

Monografia (Graduação) - UFPB/CT.

1. Moinho vertical de rolos. 2. Indústria cimenteira.
3. Soldagem de revestimento. I. Título

UFPB/BC

REBECCA MALZAC PONTES

**ANÁLISE QUANTITATIVA DE DESGASTE EM UM MOINHO
VERTICAL DE ROLOS: UM ESTUDO DE CASO**

Monografia aprovada em 04 de Julho de 2018, como parte dos requisitos para a obtenção do grau de Bacharel em Engenharia Mecânica, no curso de Engenharia Mecânica da Universidade Federal da Paraíba.

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr. José Hilton Ferreira da Silva
Orientador – UFPB/CT/DEM

Prof. Dr. Siderley Fernandes Albuquerque
Examinador – UFPB/CT/DEM

Prof. Dr. Jean Pierre Veronese
Examinador – UFPB/CT/DEM

AGRADECIMENTOS

À minha mãe, Marie Suzanne, por nunca ter medido esforços para me proporcionar a melhor educação possível e por ter sido sempre um porto seguro para mim e para minhas irmãs.

À minha avó, Dra. Nilza, por ser mais que uma avó, ser um anjo da guarda nesta vida.

Às minhas irmãs, Raissa e Lalá pelo companheirismo desde criança.

A Raimundo, por todo amor, paciência, cuidado e companheirismo.

Ao meu orientador, prof. Dr. José Hilton, pela paciência não só durante este trabalho, mas desde a primeira disciplina em que fui sua aluna. Por sempre se empenhar o máximo a me fazer entender quando tinha dúvidas e pela amizade.

A todos da Elizabeth Cimentos, que durante o período de estágio sempre foram extremamente solícitos e tanto me ajudaram na minha primeira experiência profissional. Principalmente aos mecânicos, que tiveram muita paciência para me explicar todas as minhas dúvidas. A Gleydson, Daniel e Severino pelos ensinamentos e a Seu Paulo, por ter sido o melhor chefe que alguém pode ter.

A Lamartine, inspetor de campo da Elizabeth Cimentos que disponibilizou os dados utilizados neste trabalho, por toda a boa vontade de me ajudar e pela paciência de me passar todas as informações.

A todos os professores do DEM, pelos ensinamentos que levarei para a vida.

Aos integrantes da sala 29, Rafael, Pierre e Jacques por terem ido além dos ensinamentos da sala de aula e se tornado amigos que levo pra vida.

Ao professor Jackson, *in memoriam*, por ter me dado a oportunidade de ser sua aluna de PIBIC e a todos os integrantes do LSR.

Ao professor Romualdo, por todos os ensinamentos passados desde que fui sua aluna de metrologia e pela paciência no tempo que fui sua monitora.

À CAPES e à Trinity College Dublin, pela oportunidade de realizar um intercâmbio acadêmico que considero a experiência mais engrandecedora da minha vida.

Ao Paris 26 e seus agregados, por terem vivido comigo o melhor ano da minha vida, e por terem me ajudado a me tornar a pessoa que sou hoje.

Aos meus amigos de colégio, Rachel, Natália, Priscilla, Adriano e Carlos pela amizade que permanece intacta mesmo após tantos anos após o término do 3º ano.

Aos meus companheiros de curso, por terem feito o caminho menos árduo. Em especial a José Moreira, o mago, pelo companheirismo durante o curso e pela amizade construída.

“O sucesso é ir de fracasso em fracasso sem perder o entusiasmo”

Sir Winston Churchill

RESUMO

Os mecanismos de desgaste estão diretamente relacionados a elevados custos em vários seguimentos da indústria. Na indústria cimenteira, o moinho vertical de rolos tem sido cada vez mais utilizado em detrimento do moinho tubular de bolas devido ao seu excelente consumo energético específico e alta produtividade. Entretanto, este equipamento sofre elevado desgaste e constantemente é necessário parar a produção para recuperação dos seus rolos e mesa. Este trabalho buscou analisar quantitativamente o desgaste de um moinho vertical de rolos, cujos rolos e mesa foram recuperados através do processo de soldagem por arame tubular. Para isto, verificou-se a perda de massa nos seus rolos e mesa durante dois períodos produtivos de aproximadamente três meses posteriores à recuperação por soldagem que foi realizada por duas empresas distintas. Também foi avaliada a perda de massa específica, em gramas de material desgastado por toneladas de material moído, e os perfis de desgaste dos rolos e da mesa. Concluiu-se que apesar de as ligas utilizadas pelas duas empresas terem as mesmas especificações, elas apresentaram resistências diferentes, fazendo com que em uma das campanhas o desgaste tenha sido mais agressivo. Também, que existe um padrão para o desgaste ao longo do rolo, existindo uma região em que o controle da massa perdida deve ser mais intenso. Sugere-se a utilização de capas nos rolos com insertos cerâmicos, material que mostra bons resultados em ambientes com a combinação de desgaste por impacto e abrasão para buscar aumentar a vida útil do conjunto entre uma parada e outra para manutenção.

Palavras-chave: *Moinho vertical de rolos; Indústria cimenteira; Soldagem de revestimento.*

ABSTRACT

Wear mechanisms are directly related to high costs in various industry segments. In the cement industry, the vertical roller mill has been increasingly used at the expense of the ball mill because of its excellent specific energy consumption and high productivity. However, this equipment undergoes heavy wear and it is constantly necessary to stop production for recovery of its rollers and table. The present study aimed to analyse quantitatively the wear in a vertical roller mill, whose rolls and table were recovered through the flux-cored wire welding process. For this, the loss of mass in its rolls and table was verified during two productive periods of approximately three months after the recovery by welding that was carried out by two different companies. The loss of specific mass, in grams of material worn by tons of ground material, and the rolls and table wear patterns, were also evaluated. It is concluded that although the alloys used by the two companies had the same specifications, they presented different resistances, causing that in one of the periods analysed the wear was more aggressive. Besides, that there is a pattern for the wear along the roller, so, there is a region where the control of the lost mass should be more intense. It is suggested the use of covers in the rolls with ceramic inserts, material that presents good results in environments with the combination of impact and abrasive wear to seek to increase the life time of the equipment between one stop and another for maintenance.

Key words: *Vertical roller mill; Cement Industry; Hardfacing.*

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Medições do desgaste do rolo 1 do moinho ao longo da primeira campanha.....	32
Tabela 2 - Medições do desgaste do rolo 2 do moinho ao longo da primeira campanha.....	33
Tabela 3 - Medições do desgaste do rolo 3 do moinho ao longo da primeira campanha.....	34
Tabela 4 - Medições do desgaste do rolo 4 do moinho ao longo da primeira campanha.....	36
Tabela 5 - Medições do desgaste da mesa do moinho ao longo da primeira campanha.....	37
Tabela 6 - Medições do desgaste do rolo 1 do moinho ao longo da segunda campanha.....	39
Tabela 7 - Medições do desgaste do rolo 2 do moinho ao longo da segunda campanha.....	40
Tabela 8 - Medições do desgaste do rolo 3 do moinho ao longo da segunda campanha.....	41
Tabela 9 - Medições do desgaste do rolo 4 do moinho ao longo da segunda campanha.....	42
Tabela 10 - Medições do desgaste da mesa do moinho ao longo da segunda campanha.....	43

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 - Desenho esquemático de quatro modos representativos de desgaste.....	15
Figura 2 - Desenho esquemático do processo de soldagem por arame autoprotégido.....	21
Figura 3 - Desenho esquemático de um moinho vertical de rolos.....	23
Figura 4 - Recuperação do rolo por meio de soldagem arame tubular mecanizado....	25
Figura 5 - Desenho esquemático do gabarito da mesa.....	26
Figura 6 - Gabarito da mesa.....	26
Figura 7 - Desenho esquemático do gabarito dos rolos.....	27
Figura 8 - Gabarito dos rolos.....	28
Figura 9 - Rolo do moinho após recuperação por soldagem.....	31

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1 – Perfil de Desgaste do Rolo 1 (Campanha 1).....	33
Gráfico 2 – Perfil de Desgaste do Rolo 2 (Campanha 1).....	34
Gráfico 3 – Perfil de Desgaste do Rolo 3 (Campanha 1).....	35
Gráfico 4 – Perfil de Desgaste do Rolo 4 (Campanha 1).....	36
Gráfico 5 – Perfil Desgaste da Mesa (Campanha 1).....	38
Gráfico 6 – Perfil de Desgaste do Rolo 1 (Campanha 2).....	39
Gráfico 7 – Perfil de Desgaste do Rolo 2 (Campanha 2).....	40
Gráfico 8 – Perfil de Desgaste do Rolo 3 (Campanha 2).....	41
Gráfico 9 – Perfil de Desgaste do Rolo 4 (Campanha 2).....	42
Gráfico 10 – Perfil Desgaste da Mesa (Campanha 2).....	43

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	13
1.2 OBJETIVO.....	14
1.2.1 Objetivo Geral	14
1.2.2 Objetivo Especifico.....	14
2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA.....	14
2.1 O DESGASTE E SEUS MECANISMOS	14
2.2 PROCESSOS DE SOLDAGEM	17
2.2.1 Soldagem de revestimento.....	18
2.2.2 O Processo de soldagem por arame tubular (FCAW).....	20
2.3 A INDÚSTRIA DO CIMENTO E SEUS AVANÇOS: O MOINHO VERTICAL DE ROLOS	21
3 METODOLOGIA	24
4 ANÁLISE E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS	30
4.1 CÁLCULO DO VOLUME INICIAL DOS ROLOS.....	30
4.2 RESULTADOS DA PRIMEIRA CAMPANHA: EMPRESA A	31
4.2.1 Análise do rolo 1 durante a primeira campanha: empresa A	31
4.2.2 Análise do rolo 2 durante a primeira campanha: empresa A	33
4.2.3 Análise do rolo 3 durante a primeira campanha: empresa A	34
4.2.4 Análise do rolo 4 durante a primeira campanha: empresa A	35
4.2.5 Análise da mesa de moagem durante a primeira campanha: empresa A	37
4.2.6 Cálculo da taxa de desgaste para os rolos e mesa: empresa A	38
4.3 RESULTADOS DA SEGUNDA CAMPANHA ANALISADA: EMPRESA B.....	38
4.3.1 Análise do rolo 1 durante a segunda campanha: empresa B	39
4.3.2 Análise do rolo 2 durante a segunda campanha: empresa B	40
4.3.3 Análise do rolo 3 durante a segunda campanha: empresa B	41
4.3.4 Análise do rolo 4 durante a segunda campanha: empresa B	42
4.3.5 Análise da mesa de moagem durante a segunda campanha: empresa B.....	43
5 CONCLUSÕES	44
6 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	45
ANEXO.....	48
Anexo A - Desenho do Rolo do moinho Vertical	48

1 INTRODUÇÃO

Os fenômenos de desgaste têm grande importância para a indústria em seus diversos seguimentos devido aos efeitos que estes causam em componentes e equipamentos, muitas vezes inutilizando-os. Isso ocorre devido ao desgaste ocasionar perda de massa que comina em modificações na geometria da peça. Sendo assim, principalmente para os setores de manutenção, estudar e entender os mecanismos de desgaste é imprescindível no sentido de buscar retardar sua ação utilizando materiais mais adequados e controlar os custos relacionados a substituição de peças que apresentem falha.

No mundo atual, um bom gerenciamento financeiro é fundamental para garantir a competitividade e sobrevivência de qualquer empresa. Dessa forma, a busca por diminuição de custos precisa ser constante e abranger todos os setores da empresa, buscando sempre maior eficiência e menos perdas.

A indústria cimenteira, cujos gastos com energia elétrica são extremamente elevados, tem buscado utilizar equipamentos cada vez mais eficientes. Desta maneira, o surgimento do moinho vertical de rolos com o intuito de substituir os tradicionais moinhos tubulares de bolas apresentou grandes ganhos neste sentido, pois estes chegam a apresentar uma redução de aproximadamente 40% no consumo energético. Entretanto, o novo equipamento apresenta desvantagens quanto à manutenção, pois seus rolos e mesa se desgastam bastante devido ao ambiente extremamente abrasivo e dentro de poucos meses deixam de apresentar condições adequadas de trabalho.

Assim, para que o moinho volte a ser funcional, é necessário trocar ou recuperar seus rolos e mesa, e, devido aos custos, o procedimento mais viável é a recuperação por meio de soldagem de revestimento utilizando o processo soldagem a arco com arame tubular. O processo de recuperação dura cerca de uma semana e durante este período o moinho precisa ficar parado, ocasionando grande perda de produção da fábrica de cimento.

Devido aos custos envolvidos, tanto relacionados ao procedimento de recuperação, quanto à perda de produção, é necessário avaliar continuamente o desgaste no moinho de modo a otimizar esta parada, aproveitando ao máximo o revestimento aplicado, mas ao mesmo tempo evitando que o desgaste ultrapasse os

limites recomendados pelo fabricante para garantir que o equipamento não sofra danos irreversíveis.

Desta maneira, a condição do moinho não só necessita de acompanhamento do desenvolvimento do desgaste, como se torna um desafio constante para a equipe de engenharia, pois a seleção do material de revestimento utilizado, bem como dos parâmetros de soldagem, também são cruciais para um bom desempenho.

1.2 OBJETIVO

1.2.1 Objetivo Geral

O objetivo deste trabalho é avaliar quantitativamente o desgaste em duas campanhas de um moinho vertical de rolos utilizado para moagem de farinha em uma planta cimenteira do estado da Paraíba.

1.2.2 Objetivo Específico

- Comparar a perda de massa dos elementos devido ao desgaste após a aplicação de revestimento duro nos rolos e na mesa do moinho em duas campanhas em que a recuperação foi feita por duas empresas diferentes.
- Comparar a taxa de desgaste, ou seja, a perda de massa de material por tonelada de farinha moída.
- Avaliar os perfis de desgaste dos rolos e da mesa.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

2.1 O DESGASTE E SEUS MECANISMOS

À ciência que estuda a interação entre superfícies em movimento dá-se o nome de tribologia. Desta interação surgem diversos tipos de desgaste que encurtam a vida de componentes mecânicos (RADI, 2007).

Frequentemente, partes metálicas são consideradas inutilizadas não por apresentarem falha, mas devido ao desgaste, que ocasiona perda de dimensões e conseqüentemente de funcionalidade (MILLER, 2005).

O desgaste de componentes mecânicos representa elevados custos para setores de manutenção de diversos seguimentos da indústria, pois muitos equipamentos operam sob condições severas e se desgastam rapidamente, gerando a necessidade de troca dos componentes comprometidos. Pelo mesmo motivo, tais peças usualmente são superdimensionadas, o que também incide num maior custo agregado e além disso, tais componentes podem acabar sofrendo desgaste prematuro e falhando inesperadamente, ocasionando paradas de equipamentos e perdas de produção (BAPTISTA, 2009).

Sendo assim, o estudo do desgaste é muito importante para que se possa compreender melhor seus mecanismos e tentar minimizar seu efeito destrutivo, para assim fazer um melhor aproveitamento dos componentes mecânicos afetados, diminuindo os custos e aumentando a confiabilidade do processo.

A norma DIN 50320 (DIN 50320, 1979) define desgaste como a perda progressiva de material da superfície de um corpo sólido devido à ação mecânica, isto é, por contato e movimento relativo de um corpo sólido contra um corpo sólido, líquido ou gasoso.

Segundo Baptista e Nascimento (2009), cerca de 10% da energia gerada por meios técnicos é perdida devido à fricção e outros processos de desgaste e, segundo estatísticas, de 1 a 5% do PIB de países desenvolvidos é dispendido direta ou indiretamente pela ação destruidora do desgaste, sendo assim, seu estudo tem fundamental importância na busca por diminuição de custos da sociedade atual.

Radi et al. (2007), subdivide o desgaste, como mostrado na figura 1, em quatro tipos de acordo com o mecanismo causador.

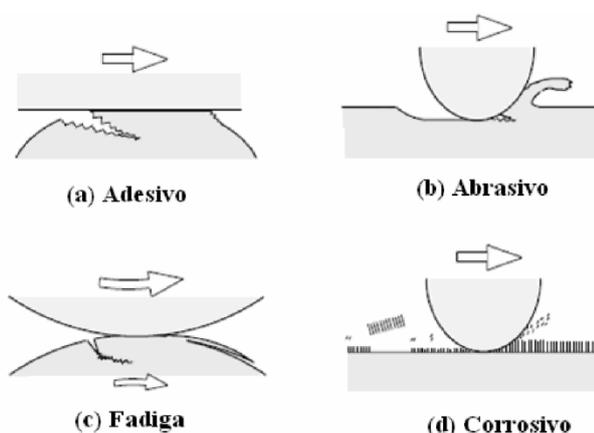


Figura 1 – Desenho esquemático de quatro modos representativos de desgaste

Fonte: Radi, 2007.

- (a) Adesivo: ocorre quando a ligação adesiva entre as superfícies é tal que o material não desliza, provocando formação e posterior rompimento das ligações adesivas interfaciais.
- (b) Abrasivo: ocorre devido à dureza e ao formato das partículas que se deslocam sobre a superfície removendo o material por sulcamento, fadiga, corte e trincamento.
- (c) Fadiga: acontece quando a remoção de material se dá devido a repetições cíclicas do movimento, causando fadiga mecânica e consequente formação de trincas na superfície, o que ocasiona separação do material.
- (d) Corrosivo: este se dá em meios corrosivos onde ocorrem reações químicas e eletroquímicas que produzem uma intercamada na superfície que depois é removida.

De acordo com Coseglio (2009), dentre os mecanismos de desgaste, a abrasão é o mais estudado devido a sua importância, pois este é a causa de cerca de 50% da perda de material por desgaste.

O desgaste abrasivo acontece sempre que um objeto sólido se choca com partículas de materiais que tem dureza igual ou superior a ele. A dimensão do desgaste abrasivo é bem maior do que aparenta, pois muitas vezes tem-se um material considerado mole que pode causar desgaste abrasivo se possuir partículas de dureza elevada dispersas em sua matriz (KOVAŘÍKOVÁ, 2009).

Além disso, por muito tempo acreditou-se que o desgaste abrasivo acontecia apenas devido as partículas que apresentam dureza superior à superfície analisada, pois durante o contato estas teriam ação semelhante aos processos de corte efetuados por máquinas ferramentas. Entretanto, hoje sabe-se que existem outros mecanismos indiretos envolvidos, como o arrancamento de grãos individuais, microfraturas e a aceleração da fadiga devido a repetidas deformações (KOVAŘÍKOVÁ, 2009).

Os mecanismos de desgaste estão relacionados a elevados custos em diversos seguimentos da indústria. Muitos dos componentes desgastados devem ser trocados ao final de sua vida útil, entretanto, em algumas situações é possível recuperá-los. Os processos de soldagem mostram-se altamente versáteis para esta função, e em muitos casos apresentam custos consideravelmente mais baixos.

2.2 PROCESSOS DE SOLDAGEM

Nos processos industriais que exigem a fabricação de equipamentos cada vez mais complexos, muitas vezes é necessário unir componentes para atender as necessidades da indústria. Os métodos de união de metais podem ser divididos em dois tipos, aqueles baseados em forças mecânicas macroscópicas, como é o caso dos parafusos e rebites, onde a resistência da junta se dá pela resistência ao cisalhamento destes elementos, e aqueles baseados em forças microscópicas, como a soldagem, na qual a união acontece por meio de ligações químicas. No segundo caso, a união deve ter caráter definitivo, e muitas vezes este método é escolhido devido ao custo, em geral razoável, e por possibilitar juntas de eficiência e integridade elevadas (MODENESI, 2012).

A utilização dos processos de soldagem mais arcaicos remonta há muitos anos, cerca de 4000 a.C., entretanto, este era considerado um processo de fabricação secundário. A partir do século XIX com o surgimento da soldagem por arco elétrico e a descoberta do acetileno, o aparecimento dos processos de soldagem por fusão, como MIG/MAG, TIG e oxicorte foi viabilizado. Atualmente existem cerca de 50 tipos de processos de soldagem utilizados industrialmente. (SANTOS, 2015, p. 11-13)

Segundo a Associação Americana de Soldagem (AWS), soldagem é o processo de junção de materiais que produz a coalescência destes, mediante seu aquecimento à temperatura apropriada com ou sem aplicação de pressão, ou apenas com aplicação de pressão e com ou sem o uso de material de adição. Outra definição interessante é utilizada por Quites (2011), que enuncia que soldagem é a operação que objetiva a união de duas ou mais peças assegurando a continuidade das propriedades químicas e físicas na junta. A ideia de continuidade é bastante importante, pois outras formas de união não são capazes de obter essa característica, como a parafusagem, rebitagem, brasagem e colagem.

Machado (1996) divide os processos de soldagem em dois grandes grupos: soldagem por pressão ou deformação e por fusão. Na soldagem por pressão a união é obtida sem que ocorra fusão dos materiais envolvidos, e utilizando-se elevadas pressões que causam deformação plástica das superfícies promovendo a união. Neste grupo, há diversos processos, tais como soldagem por fricção, por ultrassom, por difusão e por resistência elétrica.

A soldagem por pressão tem grande importância devido a sua principal vantagem, a não utilização de calor, pois assim, a estrutura dos materiais envolvidos não é modificada e fragilizada, o que proporciona uma junta de integridade confiável. Um dos processos de soldagem por deformação mais utilizados é a soldagem por resistência de ponto RSW (*Resistance Spot Welding*), que tem sido amplamente utilizada pela indústria automobilística na fabricação de carroceria de veículos (BATISTA, 2015).

A soldagem por fusão, como o nome sugere, engloba os processos em que a energia aplicada produz temperaturas elevadas, maiores que a temperatura de fusão do material. Neste caso, a junção é obtida através da solubilização na fase líquida das partes a unir. Dentre esses processos, os mais utilizados industrialmente são os que utilizam o arco elétrico como fonte de energia (MODENESI, 2012).

Por produzir elevada energia em uma região concentrada, sendo capaz de fundir metais instantaneamente, o arco elétrico impulsionou a utilização da soldagem após sua descoberta. Atualmente, existem inúmeros processos que utilizam essa tecnologia, tais como soldagem com eletrodo revestido, MIG/MAG, TIG e arco submerso.

Os processos de soldagem por fusão são muito diversificados, atendendo às mais diferentes necessidades da indústria e podendo variar quanto a utilização ou não de metal de adição, de gases de proteção, e podendo ser manuais, semi automatizados ou totalmente automáticos, como no caso dos robôs que realizam soldagens submarinas.

Além das aplicações de soldagem como processo de união, existem aplicações afins, como a soldagem de revestimento, utilizada na manutenção e manufatura de componentes mecânicos.

O processo de recuperação de peças por soldagem é amplamente difundido em vários ramos da indústria, como o sucroalcooleiro e o cimenteiro, e tem ganhado cada vez mais adeptos devido a sua versatilidade.

2.2.1 Soldagem de revestimento

De modo a tentar mitigar o prejuízo trazido pelo desgaste, à indústria desenvolveu a soldagem de revestimento, que tem por objetivo recuperar

componentes sem que seja necessária a troca, e reforçar estes componentes de modo a aumentar sua durabilidade.

A soldagem de revestimento é um método bastante utilizado por diversos seguimentos da indústria tanto para fins de manutenção como de manufatura (BUCHANAN, SHIPWAY & MCCARTNEY, 2007).

Esse procedimento consiste na aplicação de uma liga especial sobre uma superfície metálica, utilizando diversos processos de soldagem, para obter condições desejáveis de resistência ao desgaste por abrasão, impacto, adesão, alta temperatura, corrosão, ou qualquer combinação desses fatores (LINCOLN ELETRIC, 2018).

Sendo o desgaste responsável por grande perda de material em equipamentos industriais, a soldagem de revestimento mostra-se como uma alternativa à troca da peça ou equipamento desgastado, e em diversas ocasiões é a solução mais viável economicamente. Essa viabilidade é justificada por diversos fatores, como o aumento da vida útil da peça, o que ocasiona uma diminuição nos custos de estoque e diminuição do tempo de parada do equipamento, e também a possibilidade de se utilizar metais de base mais baratos, já que é o revestimento que ficará exposto. Além disso, na maioria dos casos, recuperar um equipamento em detrimento da troca pode custar de 25 a 75% menos (LINCOLN ELETRIC, 2018).

Este método é bastante versátil, podendo ser aplicado em diversos metais de base, como os aços carbono e os aços de baixa liga com até 1% de carbono. Os aços de alta liga também podem ser revestidos, mas muitas vezes requerem uma camada inicial especial. Além destes, podem ser utilizados como metal de base aços inoxidáveis, aço manganês, ferros fundidos e ligas à base de níquel e cobre.

Vários processos de soldagem podem ser utilizados para aplicar revestimento. A escolha do processo ideal deve levar em conta a função que o componente a ser revestido executa, a composição do metal de base, o tamanho e forma da superfície a ser revestida, a acessibilidade da área onde se encontra o componente, além do seu estado e da quantidade de itens a serem revestidos (LINCOLN ELETRIC, 2018).

Os processos de soldagem por arco elétrico que podem ser utilizados para realizar revestimento são: Eletrodo Revestido, Arame Tubular, Arco Submerso, TIG e MIG/MAG (PRADEEP, 2010).

Em estudo comparativo para a recuperação de facas picadoras de cana-de-açúcar da indústria sucroalcooleira, a utilização de eletrodo revestido obteve

resultados melhores que a utilização de arame tubular, pois as facas revestidas pelo segundo método apresentaram maior desgaste (LIMA *et al.*, 2012).

Entretanto, a utilização de eletrodo revestido é limitada a trabalhos onde a necessidade de alta taxa de deposição não é um fator determinante, pois este método dispense significativamente mais tempo.

Para o autor (2012), a aplicação de revestimento duro em equipamentos pela indústria do Brasil é feita tradicionalmente de forma manual utilizando o processo Eletrodo Revestido ou de maneira automatizada com o processo Arco Submerso, em casos em que a geometria da peça permite, visto que este processo só pode ser realizado na posição horizontal. Uma alternativa a estes processos vem se destacando bastante recentemente, o Arame Tubular, isso se dá devido a sua maior produtividade quando comparado ao primeiro, e sua maior versatilidade quando comparado ao segundo.

2.2.2 O Processo de soldagem por arame tubular (FCAW)

Na soldagem por arame tubular a coalescência dos metais é obtida pelo aquecimento resultante do arco formado entre um eletrodo tubular contínuo e a peça. Este eletrodo tubular apresenta internamente um fluxo que tem como funções estabilizar o arco, ajustar a composição da solda e proteger a operação (MONDENESI, 2012).

A utilização do fio fluxado foi introduzida na década de 60, pois apenas o arame sólido era utilizado anteriormente. Sua utilização trouxe bons resultados, proporcionando boa qualidade da solda, estabilidade do arco e possibilidade de soldagem em todas as posições. Sendo assim, a soldagem por arame tubular é de alto rendimento, sendo as altas taxas de deposição atingidas em comparação com os processos MIG/MAG utilizando fio sólido e particularmente com o processo por eletrodo revestido, para níveis idênticos de qualidade uma das suas principais vantagens (MICALLI JR *et al.*, 2002).

Além disso, apesar de existirem processos que apresentam maior produtividade disponíveis, como arco submerso e processos robotizados, o arame tubular oferece uma produtividade boa, com maior flexibilidade quanto a posição e um custo de capital investido relativamente baixo (ESAB, 2004).

O processo pode ser semiautomático ou completamente automatizado e possui variações quanto a proteção da solda, podendo ser auto protegido pelo fluxo interno, como também utilizar proteção adicional por meio de fluxo de gás fornecido por uma fonte externa. Um modelo esquemático do processo arame tubular sem utilização de fluxo externo de gás é mostrado na figura 2.

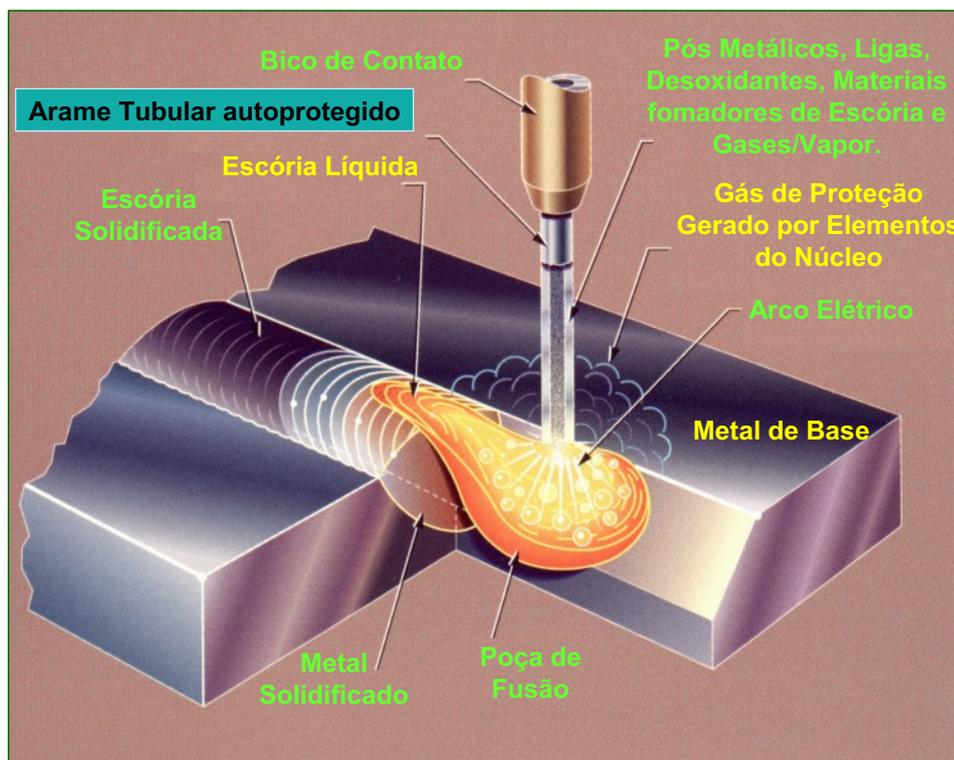


Figura 2 – Desenho esquemático do processo de soldagem por arame autoprottegido
Fonte: Elaborado pela UNICAMP, 2018.

Devido às vantagens do processo, tais como facilidade de aplicação, excelente taxa de deposição, alto rendimento que pode chegar a até 95%, baixo aporte térmico o que proporciona redução da zona termicamente afetada, o processo de soldagem com arame tubular tem sido amplamente utilizado para recuperação e revestimento de peças por meio da soldagem de revestimento (CASTOLIN EUTECTIC, 2018).

2.3 A INDÚSTRIA DO CIMENTO E SEUS AVANÇOS: O MOINHO VERTICAL DE ROLOS

O cimento é um material cerâmico de extrema importância para a construção civil, sendo uma das principais commodities do mundo e servindo até como indicador econômico. Suas matérias-primas básicas são calcário, argilas, gesso, e minério de

ferro. Inicialmente, uma mistura de calcário, argila e minério de ferro passa por um processo de calcinação para produzir clínquer, que é a base para a produção do cimento. Após esse processo, para produzir cimento de fato, são adicionados ao clínquer outros componentes que variam de acordo com o tipo do cimento num processo final de moagem (ABCP, 2012)

A indústria cimenteira é um dos seguimentos com o maior consumo energético da indústria no mundo. Apesar da maior parcela dessa energia utilizada ser térmica, devido aos combustíveis usados nos fornos e torres de pré calcinação, visto que o processo envolve elevadas temperaturas, o consumo de energia elétrica é bastante relevante. Segundo o SNIC (Sindicado Nacional da Indústria do Cimento), o consumo anual de uma fábrica padrão com capacidade produtiva de 1 milhão de toneladas por ano seria suficiente para alimentar uma cidade de 200 mil habitantes no mesmo período.

Os processos de britagem e moagem são os que mais contribuem para esse consumo de energia elétrica. Por esse motivo, a utilização de moinhos verticais de rolos em detrimento dos moinhos de bolas tem aumentado cada vez mais. Os moinhos verticais ganharam espaço pois além de apresentar um consumo energético específico menor, ocasionando diminuição dos custos do processo, ele é mais compacto, o que proporciona economia de espaço. A busca do setor por um moinho eficiente, que proporcione ótimas condições de cominuição, tenha alta produtividade e baixo custo por tonelada foi atendida (MICHEL e BOUQUIN, 2017).

Outra vantagem do moinho vertical de rolos é que ele integra várias atividades do processo de produção num só equipamento, acontecem nele, a moagem, homogeneização, secagem e classificação do material, diferente do moinho de bolas, que demanda um classificador externo.

O processo de moagem tem por objetivo reduzir as partículas do material à granulometria desejada. O moinho vertical de rolos realiza isso por meio de uma combinação de impacto, compressão, abrasão e atrito.

Os principais componentes de um moinho vertical de rolos são: carcaça, mesa de moagem, rolos moedores, sistema de acionamento, sistema de carregamento hidráulico, anel defletor (*Nozzle ring*), anel de barragem (*Dam ring*) e separador de frações de sólidos (OLIVEIRA, 2012).

O moinho vertical funciona da seguinte maneira: o material entra no moinho por uma abertura na sua parte superior e cai por gravidade no centro da mesa. Como

essa mesa está girando, a força centrífuga causada pela rotação move esse material para as extremidades. Os rolos posicionados na extremidade da mesa pressionam o material que está localizado entre eles e a mesa resultando na cominuição das partículas (PITZER, 2006).

O material vai sendo cada vez mais empurrado para as extremidades, até que ele sai da mesa e é arrastado por gases que vem do forno. Os gases do forno são reaproveitados para secar o material e arrastá-lo para a parte superior do moinho onde fica um classificador. Este classificador separa as partículas de acordo com sua granulometria.

A parte do material que atingir a granulometria especificada é levada para a próxima etapa do processo e a parte do material que tiver partículas maiores volta para o moinho e passa pelo mesmo processo até atingir a granulometria especificada.

A figura 3 mostra um desenho esquemático de um moinho vertical de rolos.



Figura 3 - Desenho esquemático de um moinho vertical de rolos
Fonte: DENSYX, 2018.

A moagem acontece a elevadas temperaturas, devido aos gases reaproveitados do forno e utilizando elevadas pressões para que se atinja o objetivo final. Essas condições cominam num ambiente bastante agressivo para os rolos e a mesa de moagem. Assim, estas partes sofrem elevado desgaste por abrasão e erosão e perdem bastante material. A perda de material diminui significativamente a

capacidade de moagem, pois ocorre um aumento da retenção de material sobre a mesa, tendendo a aumentar a potência do moinho projetada e reduzir a eficiência em consequência da transmissão não uniforme de energia para as matérias-primas (OLIVEIRA, 2012).

Devido ao desgaste, os rolos e a mesa de moagem tornam-se ineficientes para realizar sua função e em certo ponto têm que ser trocados. A reposição destes itens por um novo conjunto é economicamente inviável, assim, recuperar estes elementos por meio de soldagem de revestimento aplicando um material resistente para compensar a perda ocorrida durante os meses de funcionamento mostrou-se uma solução eficiente e de custo aceitável.

Segundo Ptizer (2006), a utilização de soldagem para recuperar os rolos e a mesa de um moinho vertical destinado a moagem de coque foi altamente bem-sucedida, alcançando resultados de produtividade estáveis e elevados, chegando a ultrapassar os valores de produção nominal do equipamento.

A indústria cimenteira também utiliza soldagem de revestimento para recuperar mesa e rolos dos moinhos verticais utilizados nas plantas, sejam para moer farinha (cru), combustível ou cimento.

3 METODOLOGIA

Neste capítulo é apresentada a metodologia utilizada para realizar as medições de desgaste nos rolos e mesa do moinho, bem como como foram feitos os cálculos para determinar a quantidade de massa perdida durante o período avaliado.

O moinho vertical de rolos avaliado neste trabalho é o modelo VRM360.4 da fabricante chinesa Nanjing C-Hope. O moinho possui 4 rolos e capacidade nominal de 220 t/h considerando sua finalidade, a moagem de farinha (cru) para a produção posterior de clínquer numa planta cimenteira do estado da Paraíba.

A indústria que tradicionalmente deveria parar sua produção duas vezes ao ano para realização de manutenção no refratário do forno, atualmente necessita de pelo menos três paradas anuais para recuperação dos rolos e da mesa do seu moinho de cru, que tem o tempo de suas campanhas variando de 3 a 4 meses entre uma parada e outra.

Durante a parada, é necessário recuperar os quatro rolos e as placas da mesa do moinho, isso equivale a depositar cerca de 5000 kg de material por meio de

soldagem *in loco*, já que devido ao porte dos equipamentos é inviável enviá-los para serem recuperados.

Por conta da elevada quantidade de material a ser aplicado, o processo de soldagem a arco com arame tubular autoprottegido foi escolhido para depositar o material de forma mecanizada, como pode ser visto na figura 4.



Figura 4 - Recuperação do rolo por meio de soldagem arame tubular mecanizado.
Fonte: Próprio Autor, 2018.

Durante esta etapa, os quatro rolos são recuperados simultaneamente.

Para avaliar o desgaste dos rolos e da mesa são realizadas medições periódicas geralmente com um intervalo de 15 dias entre uma e outra. São medidos os desgastes dos 4 rolos, cada um individualmente, e da mesa.

Na medição do desgaste da mesa utiliza-se um gabarito, que é apoiado em duas extremidades da mesa que não sofrem desgaste e posteriormente nivelado de acordo com um dispositivo acoplado ao gabarito para evitar erros relacionados à falta de planicidade.

Após estes procedimentos, são efetuadas 11 medições igualmente espaçadas utilizando um paquímetro de profundidade com resolução de 0,05 mm. As medições efetivas são aproximadas para a primeira casa decimal e a partir da leitura do paquímetro subtrai-se a altura do gabarito e a distância deixada entre o gabarito e a mesa.

O desenho esquemático do gabarito utilizado e uma fotografia dele na mesa podem ser vistos na figura 5 e figura 6, respectivamente:

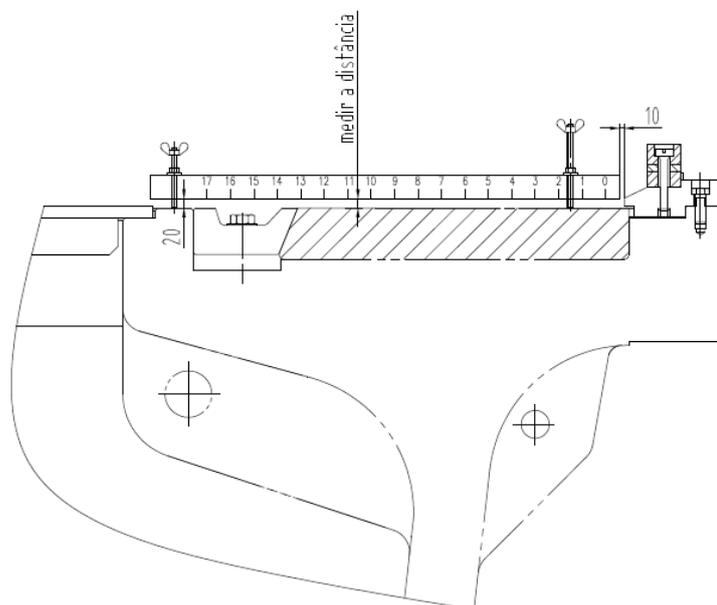


Figura 5 – Desenho esquemático do gabarito da mesa
Fonte: Elizabeth Cimentos, 2018.



Figura 6 – Gabarito da Mesa
Fonte: Elizabeth Cimentos, 2018.

Para calcular a perda de massa das placas da mesa, calcula-se a área superficial destas, sendo representada pela área de um cilindro vazado; o raio externo é a distância entre o centro do moinho e a extremidade da placa e o raio interno é a distância do centro do moinho ao início da placa. Posteriormente multiplica-se essa área pela altura do material depositado para calcular o volume, como pode ser visto na equação 1.

$$(\pi R^2 - \pi r^2) \cdot h \quad (1)$$

Sendo: R - o raio externo das placas;
r - o raio interno;
h - a altura.

A diferença dos volumes entre 2 medições, multiplicada pela densidade do material fornece o valor da quantidade de massa perdida.

Para medir o desgaste dos rolos também se utiliza um gabarito. Este é preso na frente do rolo por um parafuso M36x90 e são realizadas 10 medições igualmente espaçadas para avaliar a curva de desgaste do rolo. O desenho esquemático do gabarito utilizado para as medições dos rolos e uma foto dele são mostrados nas figuras 7 e figura 8, respectivamente.

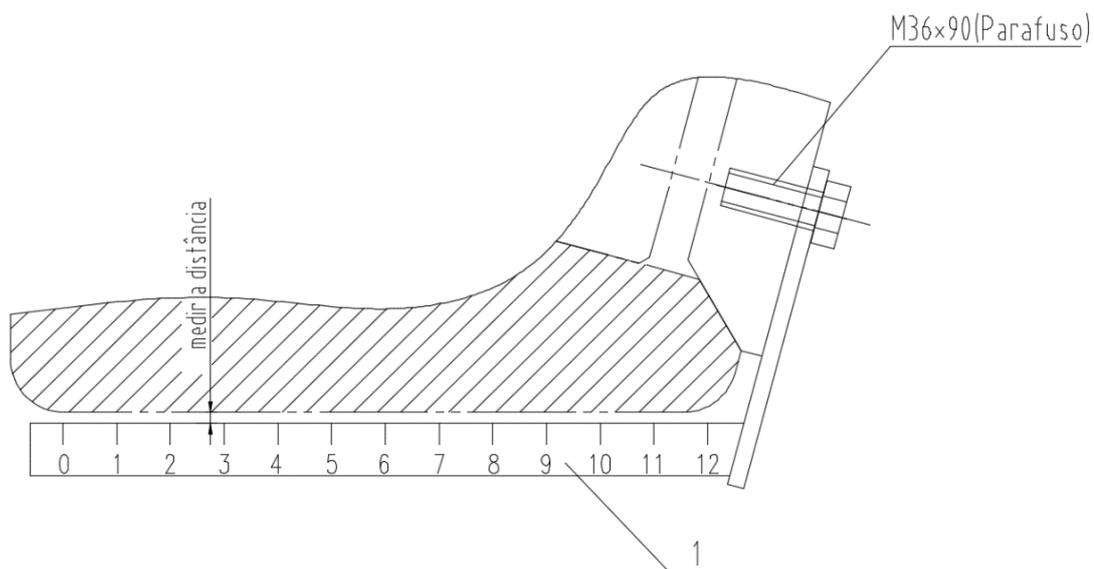


Figura 7 – Desenho esquemático do gabarito dos rolos
Fonte: Elizabeth Cimentos, 2018.



Figura 8 – Gabarito dos rolos
Fonte: Elizabeth Cimentos, 2018.

Para calcular a quantidade de massa perdida nos rolos foi utilizado o volume de um tronco de cone maciço, utilizando a equação 2. Após cada medição calculou-se a diferença entre as medições feitas e os valores iniciais para estimar o volume de material perdido devido ao desgaste. Posteriormente, multiplicando esse valor pela densidade aproximada do material, 7850 kg/m^3 , tem-se a quantidade de massa perdida devido ao desgaste.

$$V = \frac{\pi h}{3} \cdot (R^2 + Rr + r^2) \quad (2)$$

Sendo: h - a altura do tronco de cone;
 R - o raio da base maior;
 r - o raio da base menor.

Como o desgaste não é uniforme, foi feita uma média do desgaste nas dez medições e subtraída dos raios iniciais para se alcançar um valor mais próximo da realidade.

O fabricante do moinho recomenda que não se deixe que o desgaste atinja uma perda que corresponda a uma diminuição superior a 50 mm de revestimento nos rolos.

Isto porque quando se aplica revestimentos com mais de 50 mm de espessura, pode ocorrer destacamento da solda, o que geraria grandes problemas e uma pausa forçada do equipamento para que se recupere o rolo afetado.

Esta limitação de deposição de material torna necessário o acompanhamento do desgaste dos rolos continuamente, pois caso a camada de material desgastado ultrapasse 50 mm, existe uma grande dificuldade de fazer com que o rolo retorne às suas dimensões originais. Isto acontece, pois para retornar os valores nominais, a camada depositada por soldagem teria que ultrapassar o valor de segurança recomendado pelo fabricante.

Sendo assim, as medições constantes têm por objetivo garantir que caso o equipamento sofra um alto desgaste prematuro existirá tempo suficiente para uma tomada de decisão de modo a minimizar os danos sofridos pelo moinho.

Antes de iniciar a recuperação dos elementos, utiliza-se um processo de goivagem, que a partir do calor gerado entre um eletrodo de carbono e a peça faz a remoção física do metal de base ou metal de solda; simultaneamente às elevadas temperaturas, um fluxo de ar comprimido passa através do arco com rapidez suficiente para soprar o material fundido e removê-lo. Esta etapa tem por objetivo nivelar parcialmente a região que será recuperada para obter maior uniformidade na aplicação da solda.

Ambas as empresas que realizaram a recuperação dos rolos e da mesa do moinho utilizaram dois tipos diferentes de metais de adição. O primeiro material foi usado em maior quantidade, sendo assim a base do revestimento, por ser um material de menor custo. Posteriormente foi depositado um material considerado mais resistente nos passes finais, mas que possui um maior valor agregado.

A base foi feita com um arame tubular autoprotégido composto por uma liga de carboneto de cromo. Esta liga tem alta resistência ao desgaste abrasivo e por pressão e suporta choques moderados. Além disso, segundo o fabricante, apresenta dureza média de 60HRc, elevada taxa de deposição, baixa diluição e arco de fácil controle.

Os passes finais foram realizados utilizando uma liga diferente. O segundo arame tubular utilizado, também autoprotégido, diferente do anterior por depositar uma liga de carbonetos complexos, sendo composta por carbonetos de Cromo, Nióbio e Boro, além de possuir alto teor de carbono. A dureza desta liga chega a 62HRc, e ela apresenta alto rendimento, depósitos sem escória e baixa diluição com o metal de base, segundo dados do fabricante.

Ambas as ligas utilizadas são normalizadas segundo a AWS e tem composições de todos os seus componentes podendo variar de acordo com uma faixa permitida pela associação. Sendo assim, cada fabricante pode utilizar uma composição própria, dentro dos limites aceitáveis, apresentando ligas com características finais que muitas vezes variam entre si mesmo que façam parte da mesma classificação.

Este trabalho faz uma avaliação quantitativa do desgaste de duas campanhas do moinho vertical de rolos de uma planta cimenteira do estado da Paraíba. A campanha corresponde ao período produtivo do moinho entre duas paradas para recuperação dos rolos e da mesa. Nas campanhas avaliadas, duas empresas diferentes foram responsáveis pela recuperação dos rolos e da mesa do moinho. Serão avaliadas a quantidade de massa perdida devido ao desgaste, a taxa de desgaste, em gramas de massa perdida por tonelada de material moído, e os perfis de desgaste.

4 ANÁLISE E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

Neste capítulo serão apresentados os resultados de todo o procedimento descrito na metodologia deste trabalho. Os dados apresentados são referentes a duas campanhas do moinho vertical de rolos, tendo a recuperação por meio de soldagem de revestimento sido feita por duas empresas distintas. As empresas serão chamadas neste trabalho como empresa A e empresa B. São avaliadas a quantidade de massa perdida, em kg, a taxa de desgaste em gramas de material perdido por tonelada de material moído, e os perfis de desgaste.

4.1 CÁLCULO DO VOLUME INICIAL DOS ROLOS

O valor de referência utilizado nas medições é o volume de um tronco de cone maciço com os valores nominais fornecidos pelo fabricante como pode ser visto no anexo A.

A partir das dimensões nominais, calculou-se através da equação 2 o volume do rolo do moinho, que equivale ao volume de um tronco de cone.

$$V = \frac{\pi \cdot 0,57}{3} \cdot (0,983^2 + 0,983 \cdot 0,83 + 0,83^2) = 1,475 \text{ m}^3$$

A figura 9 mostra um rolo do moinho vertical antes de iniciar a campanha logo após o processo de enchimento por soldagem.



Figura 9 – Rolo do moinho após recuperação por soldagem
Fonte: Elizabeth Cimentos, 2018

4.2 RESULTADOS DA PRIMEIRA CAMPANHA: EMPRESA A

A primeira campanha avaliada neste trabalho teve início em 11 de abril de 2016 e o procedimento de recuperação por soldagem foi realizado pela empresa A. Inicialmente foi avaliado o desgaste nos 4 rolos individualmente e posteriormente o desgaste na mesa do moinho. A partir das medições foi possível estimar o volume de material perdido.

4.2.1 Análise do rolo 1 durante a primeira campanha: empresa A

A Tabela 1 abaixo mostra os dados das medições efetuadas no rolo 1 durante a referida campanha. Os valores correspondentes à diferença entre uma medição e outra correspondem à camada de material perdido neste período.

LEITURAS REALIZADAS - ROLO 01 (mm)											
Pontos	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	Média
11/04/16	61,3	55,0	53,4	52,9	55,8	55,5	53,7	53,0	52,6	54,8	54,8
03/05/16	63,5	60,7	61,9	62,0	61,1	62,0	58,5	57,4	52,7	54,8	59,5
19/05/16	63,5	62,0	68,0	67,0	61,9	62,0	58,8	57,4	52,9	55,2	60,9
22/06/16	68,8	72,7	83,1	79,7	73,0	69,9	65,5	63,2	57,4	56,7	69,0
06/07/16	73,1	75,3	85,5	84,0	77,1	74,0	69,0	64,9	59,0	56,7	71,9
13/07/16	74,7	81,8	91,2	92,2	81,0	77,4	73,3	69,4	61,2	58,2	76,0
27/07/16	74,7	82,1	93,8	92,2	81,0	77,4	74,2	69,4	61,2	58,2	76,4

Tabela 1 - Medições do desgaste do rolo 1 do moinho ao longo da primeira campanha
Fonte: Próprio Autor, 2018

A partir da diferença entre a última e a primeira medição, tem-se a diminuição média nos raios para o cálculo do novo tronco de cone, esta perda de espessura é de 26,1 mm. Assim, a diferença entre os volumes inicial e final representa o volume de material perdido devido ao desgaste. O cálculo do volume do rolo ao final da campanha é:

$$V = \frac{\pi \cdot 0,57}{3} \cdot (0,9614^2 + 0,9614 \cdot 0,8084 + 0,8084^2) = 1,406 \text{ m}^3$$

Considerando a perda de volume de 0,069 m³, e multiplicando esse valor pela densidade do material de 7850 kg/m³, tem-se a perda de material durante a campanha no primeiro rolo, que equivale a 541,6 kg.

Como pode ser verificado na tabela das medições, o desgaste não é uniforme ao longo do rolo e o perfil de desgaste é representado no gráfico 1 abaixo.

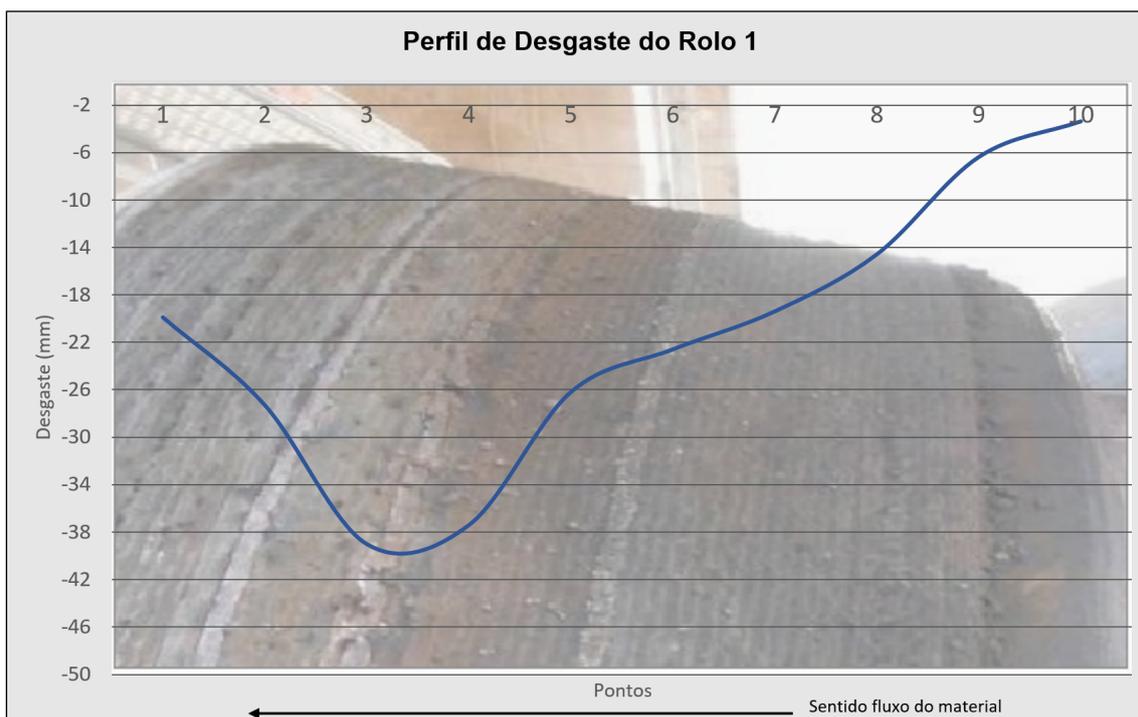


Gráfico 1 – Perfil de Desgaste do Rolo 1 (Campanha 1)
Fonte: Elaborado pelo autor, 2018

4.2.2 Análise do rolo 2 durante a primeira campanha: empresa A

A tabela 2 abaixo mostra os dados das medições efetuadas no rolo 2 durante a primeira campanha. Os procedimentos de cálculo utilizados para analisar o volume de material perdido foram análogos aos do rolo 1.

LEITURAS REALIZADAS - ROLO 02 (mm)											
Pontos	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	Média
11/04/16	72,6	58,6	51,1	55,1	53,0	51,5	53,0	55,8	57,0	59,7	56,7
03/05/16	73,9	63,5	59,6	60,7	57,0	55,7	53,9	55,8	57,0	59,7	59,7
19/05/16	75,3	64,3	61,9	66,8	62,4	57,4	57,3	55,8	57,0	59,7	61,8
22/06/16	78,4	70,9	74,5	76,3	70,0	62,2	61,1	58,4	57,0	59,7	66,9
06/07/16	81,3	75,8	80,1	81,6	76,9	70,5	64,3	59,7	57,0	59,7	70,7
13/07/16	84,0	76,1	80,1	81,7	80,9	70,5	64,3	59,9	57,0	59,7	71,4
27/07/16	84,0	81,9	94,5	95,0	88,1	70,6	66,4	62,2	57,0	59,7	75,9

Tabela 2 - Medições do desgaste do rolo 2 do moinho ao longo da primeira campanha
Fonte: Elaborado pelo autor, 2018

Utilizando esses valores, o cálculo do volume do rolo 2 ao final da campanha, considerando a diminuição de espessura de 19,2 mm é:

$$V = \frac{\pi \cdot 0,57}{3} \cdot (0,9638^2 + 0,9638 \cdot 0,8108 + 0,8108^2) = 1,413 \text{ m}^3$$

A partir deste valor, tem-se que a perda de volume neste rolo durante a campanha foi de 0,062 m³, o que equivale a uma perda de 486,7 kg devido ao desgaste. O perfil de desgaste do rolo 2 é representado no gráfico 2 abaixo.

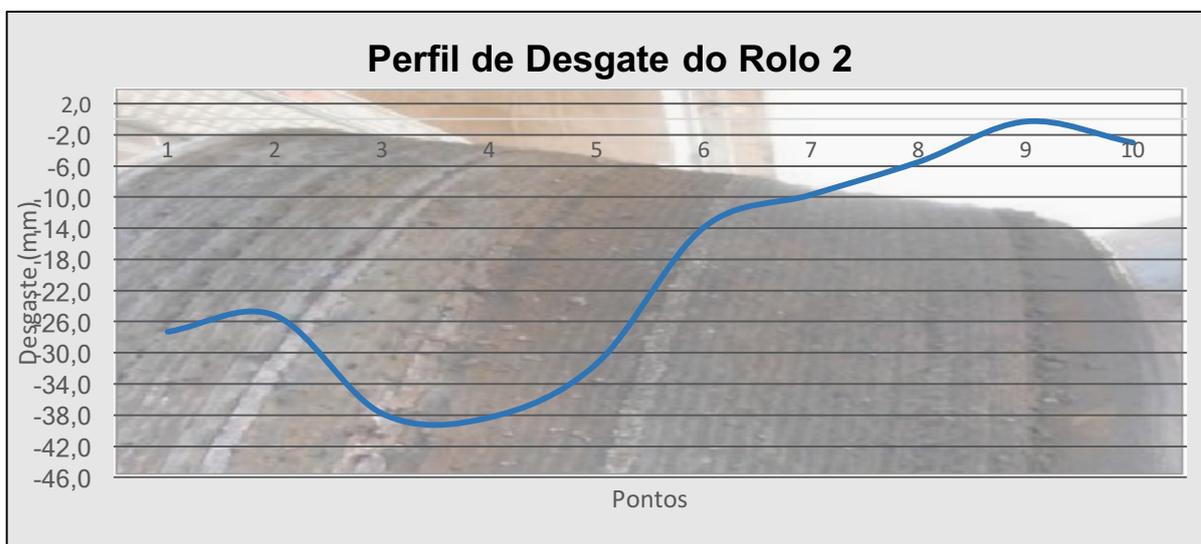


Gráfico 2 – Perfil de Desgaste do Rolo 2 (Campanha 1)
Fonte: Elaborada pelo Autor, 2018.

4.2.3 Análise do rolo 3 durante a primeira campanha: empresa A

A tabela 3 abaixo mostra os dados das medições efetuadas no rolo 3 durante a primeira campanha. Os procedimentos de cálculo utilizados para analisar o volume de material perdido também foram análogos aos do rolo 1.

LEITURAS REALIZADAS - ROLO 03 (mm)											
Pontos	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	Média
11/04/16	65,8	58,0	53,0	57,2	55,6	55,0	55,2	52,9	54,0	51,6	55,8
03/05/16	65,8	58,0	57,7	60,6	56,1	56,6	55,2	52,9	54,0	54,0	57,1
19/05/16	65,8	62,7	67,7	68,8	62,3	62,0	56,8	56,0	54,2	54,0	61,0
22/06/16	74,3	68,8	72,9	81,6	76,6	69,3	65,7	63,3	58,4	54,0	68,5
06/07/16	76,0	74,0	86,3	92,3	85,6	78,0	67,1	64,4	59,6	54,2	73,8
13/07/16	77,0	78,6	93,4	98,2	87,3	81,0	70,1	66,4	61,1	54,2	76,7
27/07/16	79,6	78,6	94,7	99,5	98,4	85,2	71,5	68,8	65,1	55,4	79,7

Tabela 3 - Medições do desgaste do rolo 3 do moinho ao longo da primeira campanha
Fonte: Elaborado pelo autor, 2018

O volume final desse rolo, considerando os valores acima e uma diminuição de espessura de 23,9 mm equivale a:

$$V = \frac{\pi \cdot 0,57}{3} \cdot (0,9591^2 + 0,9591 \cdot 0,8061 + 0,8061^2) = 1,398 \text{ m}^3$$

Sendo assim, a diferença entre o volume inicial e final desse rolo corresponde a 0,077 m³, o equivalente a uma perda de 604,4 kg de material devido ao desgaste. O perfil de desgaste do rolo 3 é representado no gráfico 3 abaixo.

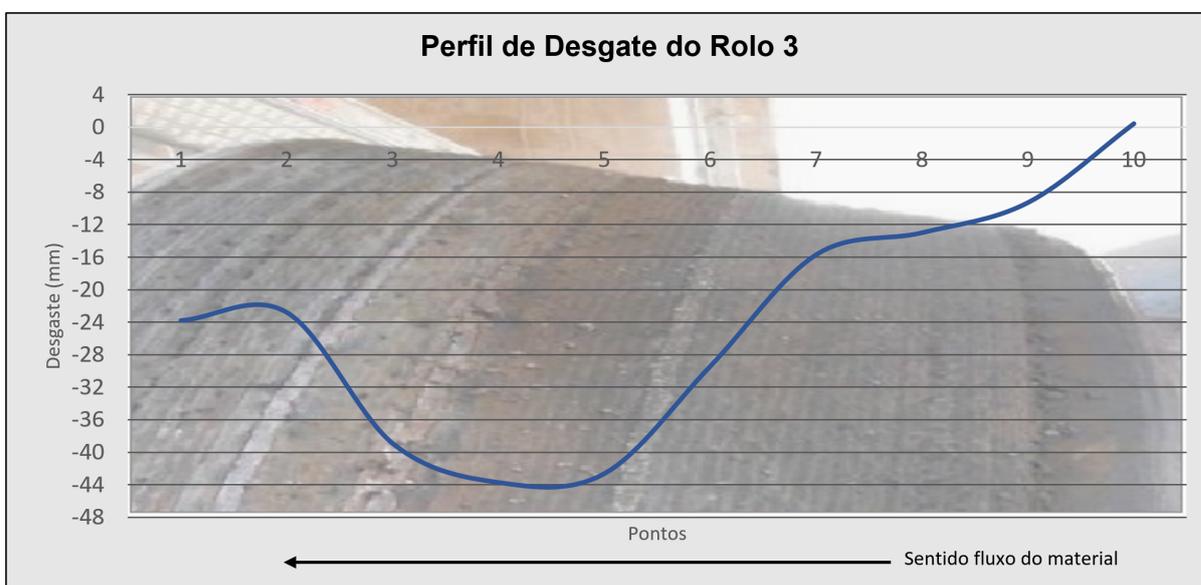


Gráfico 3 – Perfil de Desgaste do Rolo 3 (Campanha 1)
Fonte: Elaborado pelo Autor, 2018.

4.2.4 Análise do rolo 4 durante a primeira campanha: empresa A

A tabela 4 abaixo apresenta os valores das medições referentes ao rolo 4 durante a primeira campanha, e os cálculos serão feitos também de maneira análoga ao rolo 1.

LEITURAS REALIZADAS - ROLO 04 (mm)											
Pontos	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	Média
11/04/16	60,0	51,7	53,6	54,6	51,7	51,8	50,5	53,7	56,4	57,7	54,2
03/05/16	60,0	52,0	54,5	54,6	52,3	52,0	50,8	53,7	56,4	57,7	54,4
19/05/16	63,7	57,1	61,3	57,4	54,1	53,0	51,0	53,7	56,4	57,7	56,5
22/06/16	69,0	70,2	78,4	76,4	66,5	63,7	57,4	56,0	57,8	57,7	65,3
06/07/16	73,7	74,9	84,6	86,1	77,8	68,0	63,0	59,4	59,6	57,7	70,5
13/07/16	78,3	78,5	89,0	93,4	82,9	78,0	68,5	64,4	62,8	58,0	75,4
27/07/16	80,2	87,4	91,3	97,0	88,4	87,0	87,6	75,1	67,0	60,4	82,1

Tabela 4 - Medições do desgaste do rolo 4 do moinho ao longo da primeira campanha
Fonte: Elaborado pelo autor, 2018

O volume final desse rolo, considerando os valores das medições e a diminuição de espessura de 27,9 mm equivale a:

$$V = \frac{\pi \cdot 0,57}{3} \cdot (0,9551^2 + 0,9551 \cdot 0,8021 + 0,8021^2) = 1,386 \text{ m}^3$$

A partir desse volume final, tem-se uma diferença de volume de 0,089 m³, que corresponde a uma perda de massa de 698,6 kg. O perfil de desgaste do rolo 4 é representado no gráfico 4 abaixo.

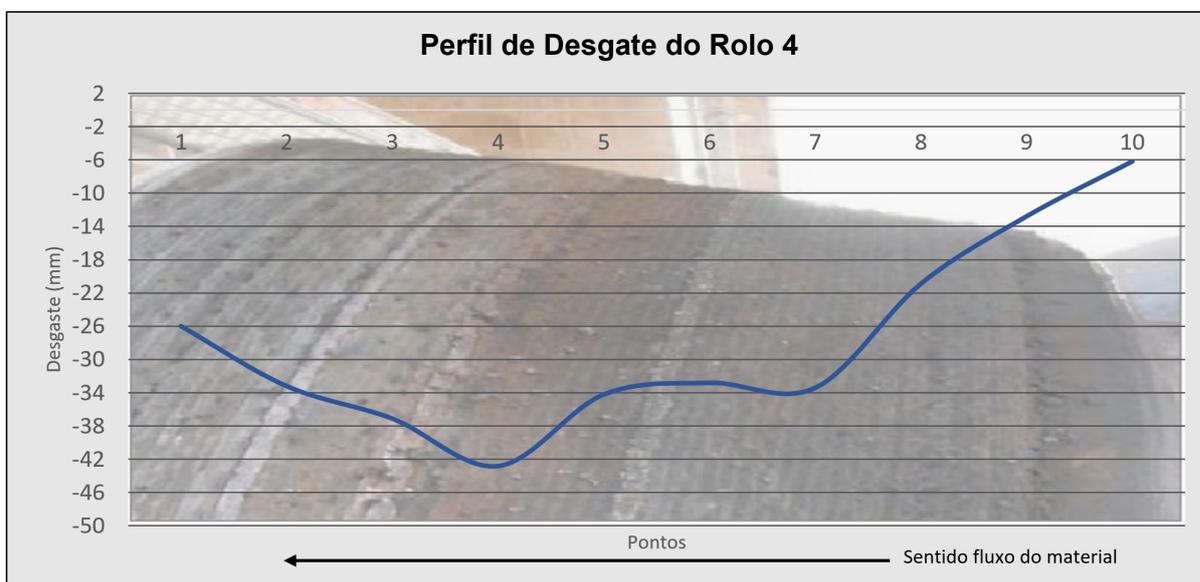


Gráfico 4 – Perfil de Desgaste do Rolo 4 (Campanha 1)
Fonte: Elaborado pelo Autor, 2018.

4.2.5 Análise da mesa de moagem durante a primeira campanha: empresa A

Os valores das medições efetuadas na mesa são mostrados na tabela 5. O volume da mesa corresponde ao volume de um cilindro vazado e utilizou-se a equação 1 para calculá-lo.

LEITURAS REALIZADAS – MESA (mm)												
Pontos	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	Média
11/04/16	65,0	64,1	65,2	66,6	63,0	64,3	68,0	66,6	65,5	70,0	68,9	66,1
03/05/16	65,0	64,1	65,2	66,6	63,2	64,3	68,0	70,5	70,4	70,0	68,9	66,9
19/05/16	70,4	71,5	74,5	75,3	74,0	75,4	78,7	77,7	75,7	71,6	68,9	74,0
22/06/16	75,5	77,7	80,5	81,0	79,1	80,5	83,0	84,6	82,5	77,6	69,1	79,2
06/07/16	75,5	77,9	80,5	81,0	79,1	80,5	83,0	84,6	84,5	82,5	69,1	79,8
13/07/16	75,8	79,4	81,6	84,0	83,7	86,6	90,0	92,6	93,5	82,5	69,2	83,5
27/07/16	78,1	82,0	82,4	86,4	84,9	88,7	93,9	98,0	99,3	88,8	70,5	86,6

Tabela 5 - Medições do desgaste da mesa do moinho ao longo da primeira campanha
Fonte: Elaborado pelo autor, 2018

A partir destes valores é possível calcular a perda de material devido ao desgaste na mesa. Sabendo-se que o raio externo das placas é 3680 mm e o raio interno é 2257 mm, calcula-se o volume de material perdido utilizando a área do círculo vazado e multiplicando-se pela altura diminuída devido ao desgaste para obter o volume. Considerando apenas as medições inicial e final, a altura perdida devido ao desgaste equivale a 20,5 mm, assim, o volume de material é:

$$V = \frac{\pi}{4} \cdot (3,68^2 - 2,257^2) \cdot 0,0205 = 0,136 \text{ m}^3$$

Multiplicando este volume pela densidade média do material, que é 7850 kg/m³, tem-se a quantidade de material perdido devido ao desgaste é 1067,6 kg. O perfil de desgaste da mesa pode ser visto no gráfico 5 abaixo.

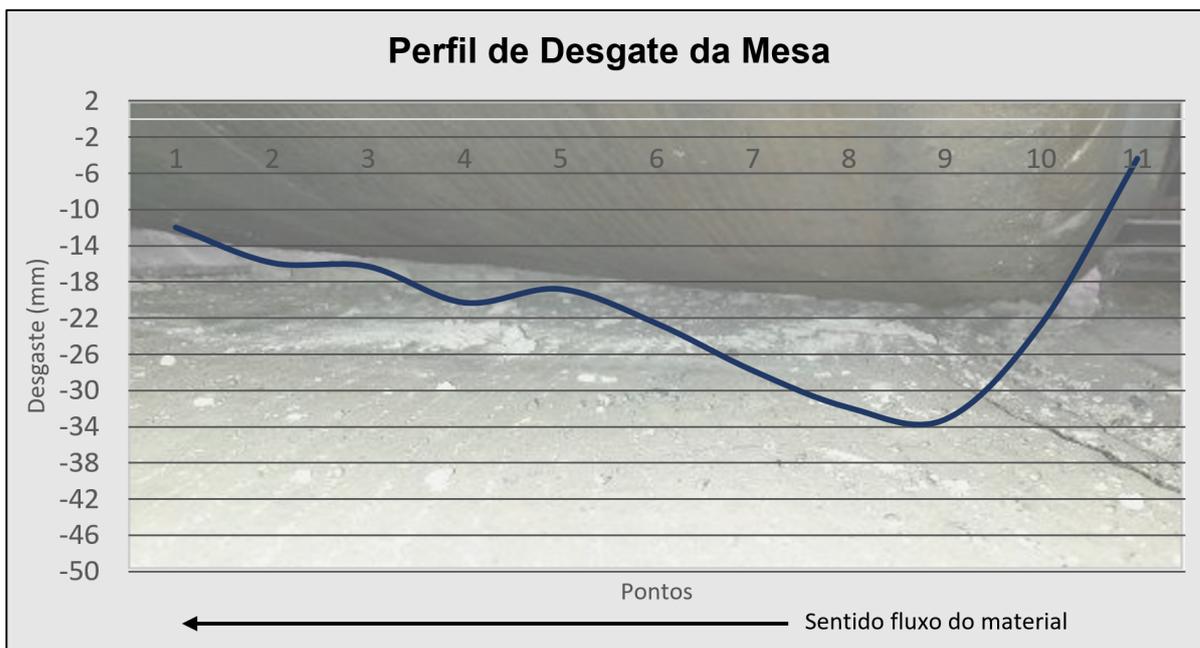


Gráfico 5 – Perfil Desgaste da Mesa (Campanha 1)
Fonte: Elaborado pelo Autor, 2018

4.2.6 Cálculo da taxa de desgaste para os rolos e mesa: empresa A

Considerando os 4 rolos, tem-se o valor total da perda de massa devido ao desgaste sem considerar a mesa, que equivale a 2331,3 kg. A produção de farinha no período foi de 441657,46 toneladas. Assim, a taxa de desgaste dos rolos foi de 5,28 g/t.

Para a mesa, como a perda total de massa equivale a 1067,6 kg, tem-se a taxa de desgaste de 2,42 g/t.

Avaliando o conjunto completo, a perda de massa devido ao desgaste foi de 3398,9 kg, resultando em uma taxa de desgaste total de 7,70 g/t durante a primeira campanha que teve o procedimento de recuperação dos rolos e da mesa executados pela empresa A.

4.3 RESULTADOS DA SEGUNDA CAMPANHA ANALISADA: EMPRESA B

A segunda campanha analisada teve seu início em agosto de 2016. Para esta campanha, o processo de recuperação por meio de soldagem foi executado pela empresa B. Os procedimentos de cálculo feitos nesta seção são análogos à seção anterior.

4.3.1 Análise do rolo 1 durante a segunda campanha: empresa B

A tabela 6 abaixo mostra os dados das medições efetuadas no rolo 1 durante a segunda campanha.

LEITURAS REALIZADAS - ROLO 01 (mm)											
Pontos	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	Média
23/08/16	71,9	60,4	55,0	53,9	52,8	53,7	55,9	54,0	52,4	53,6	56,4
14/09/16	78,4	66,0	62,4	62,7	60,1	58,6	58,7	56,0	54,6	53,6	61,1
28/09/16	78,4	69,9	68,0	66,0	64,3	59,4	59,9	56,2	54,6	53,6	63,0
11/10/16	81,8	81,0	82,1	79,1	73,0	65,2	62,6	57,6	55,4	53,6	69,1
26/10/16	89,0	87,0	95,4	92,9	87,0	73,1	69,2	63,6	57,3	53,6	76,8
21/11/16	93,2	105,6	104,9	95,4	89,4	82,1	74,0	67,5	58,9	53,6	82,5

Tabela 6 - Medições do desgaste do rolo 1 do moinho ao longo da segunda campanha
Fonte: Elaborada pelo autor, 2018

Utilizando-se a primeira e a última medição, tem-se que a perda média devido ao desgaste equivale a 26,1 mm. Assim, o novo volume considerando os novos valores pode ser calculado a partir da mesma equação.

$$V = \frac{\pi \cdot 0,57}{3} \cdot (0,9569^2 + 0,9569 \cdot 0,8039 + 0,8039^2) = 1,39 \text{ m}^3$$

Assim, a variação de volume no rolo 1 durante essa campanha foi de 0,085 m³, que multiplicado pela densidade do material equivale a 667,25 kg de material pedido devido a ação do desgaste. O perfil de desgaste do rolo 1 durante a segunda campanha pode ser observado no gráfico 6 abaixo.

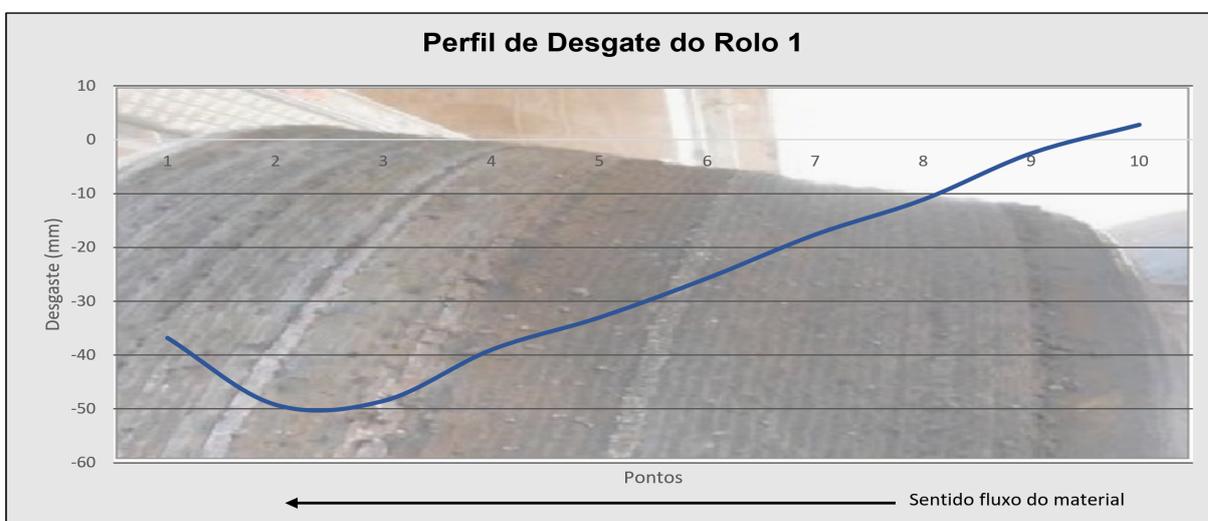


Gráfico 6 – Perfil de Desgaste do Rolo 1 (campanha 2)
Fonte: Elaborado pelo autor, 2018

4.3.2 Análise do rolo 2 durante a segunda campanha: empresa B

A tabela 7 abaixo apresenta os dados das medições efetuadas no rolo 2 durante a campanha.

LEITURAS REALIZADAS - ROLO 02 (mm)											
Pontos	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	Média
23/08/16	87,3	65,5	60,3	52,8	53,4	55,4	54,0	55,0	55,4	53,6	59,3
14/09/16	87,3	67,8	65,5	60,0	60,1	57,9	55,1	55,0	55,4	53,6	61,8
28/09/16	87,3	67,8	69,0	69,6	66,6	63,6	61,0	55,7	55,4	53,6	65,0
11/10/16	87,3	72,2	81,3	79,6	73,1	69,0	64,7	58,6	57,3	53,6	69,7
26/10/16	88,0	78,8	88,3	90,1	83,0	79,2	69,5	63,4	60,8	53,6	75,5
21/11/16	95,7	85,1	99,4	99,7	88,6	89,2	77,1	67,9	62,0	53,6	81,8

Tabela 7 - Medições do desgaste do rolo 2 do moinho ao longo da campanha
Fonte: Elaborado pelo autor, 2018

O volume final deste rolo ao final da campanha, considerando uma perda média equivalente a 22,5 mm de espessura é:

$$V = \frac{\pi \cdot 0,57}{3} \cdot (0,9605^2 + 0,9605 \cdot 0,8076 + 0,8076^2) = 1,403 \text{ m}^3$$

A variação de volume neste caso equivale a 0,072 m³, correspondente a 565,2 kg de material. O perfil de desgaste do rolo 2 durante a segunda campanha pode ser visto no gráfico 7 abaixo.

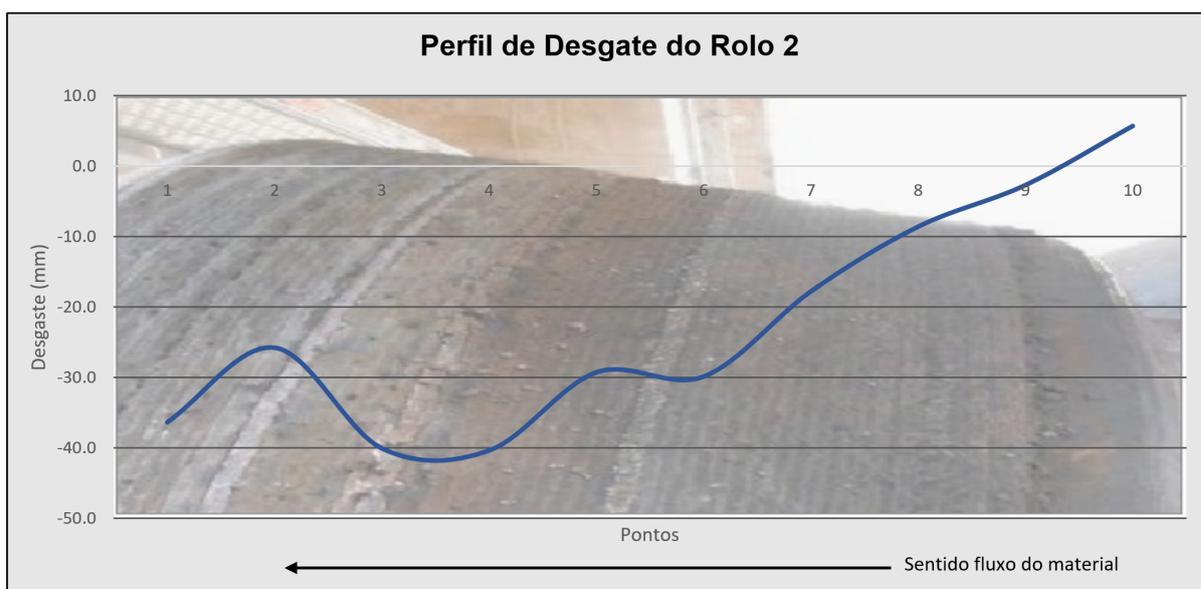


Gráfico 7 – Perfil de Desgaste do Rolo 2 (Campanha 2)
Fonte: Elaborado pelo Autor, 2018

4.3.3 Análise do rolo 3 durante a segunda campanha: empresa B

Para o rolo 3, cujos dados das medições são apresentados na tabela 8, tem-se:

LEITURAS REALIZADAS - ROLO 03 (mm)											
Pontos	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	Média
23/08/16	70,0	63,6	61,5	59,4	59,6	55,8	54,7	53,6	53,6	52,8	58,5
14/09/16	73,9	69,4	69,0	66,6	62,7	60,7	57,3	57,1	54,2	54,2	62,5
28/09/16	74,9	70,8	74,5	75,0	75,8	69,6	65,5	63,9	60,2	56,2	68,6
11/10/16	85,4	81,0	87,7	85,9	84,6	76,0	69,7	66,3	61,8	56,2	75,5
26/10/16	86,1	86,0	90,4	96,7	91,9	83,7	81,8	76,0	69,3	57,5	81,9
21/11/16	90,7	94,7	107,9	101,2	100,2	96,9	93,9	94,5	80,1	57,5	91,8

Tabela 8 - Medições do desgaste do rolo 3 do moinho ao longo da segunda campanha
Fonte: Elaborado pelo autor, 2018

O volume final deste rolo, utilizando a variação nos raios de 33,3 mm devido a perda de material pode ser calculado como:

$$V = \frac{\pi \cdot 0,57}{3} \cdot (0,9497^2 + 0,9497 \cdot 0,7967 + 0,7967^2) = 1,37 \text{ m}^3$$

A partir do volume final tem-se que o desgaste no rolo 3 corresponde a perda de 824,24 kg de material. O perfil de desgaste do rolo 3 pode ser visto abaixo no gráfico 8.

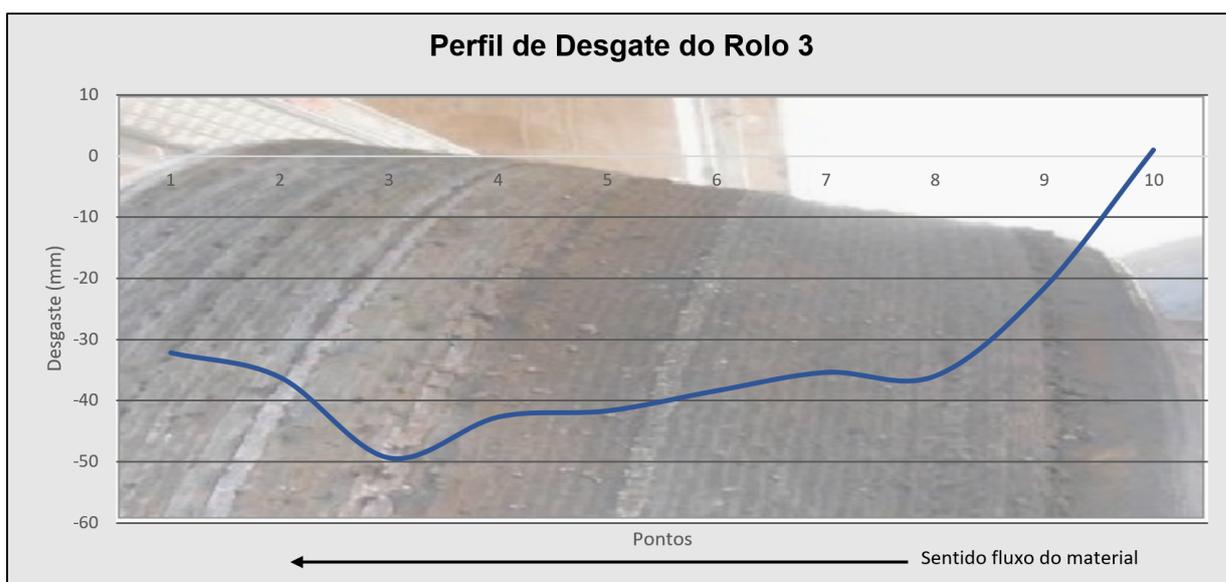


Gráfico 8 – Perfil de Desgaste do Rolo 3 (Campanha 2)
Fonte: Elaborado pelo Autor, 2018.

4.3.4 Análise do rolo 4 durante a segunda campanha: empresa B

Analisando os dados do rolo 4, apresentados na tabela 9, tem-se:

LEITURAS REALIZADAS - ROLO 04 (mm)											
Pontos	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	Média
23/08/16	82,2	78,9	67,2	64,4	62,9	58,5	54,8	56,1	56,2	56,5	63,8
14/09/16	86,7	82,7	81,8	67,1	65,9	64,5	62,8	63,9	59,5	61,0	69,6
28/09/16	86,7	82,7	81,8	71,5	74,0	72,2	69,0	63,9	59,5	61,0	72,2
11/10/16	87,5	89,7	90,9	88,8	83,2	80,8	77,0	74,1	69,3	66,7	80,8
26/10/16	93,9	101,0	105,0	102,0	102,5	91,3	85,9	84,5	78,4	74,7	91,9
21/11/16	102,4	113,7	123,6	120,3	116,6	102,5	93,7	98,0	99,6	91,3	106,2

Tabela 9 - Medições do desgaste do rolo 4 do moinho ao longo da segunda campanha

Fonte: Elaborado pelo autor, 2018

Pode-se obter o volume final deste rolo da mesma maneira dos anteriores, sendo neste caso a espessura média diminuída, 42,4 mm, assim tem-se:

$$V = \frac{\pi \cdot 0,57}{3} \cdot (0,9406^2 + 0,9406 \cdot 0,7876 + 0,7876^2) = 1,34 \text{ m}^3$$

Assim, a quantidade de massa representada por essa variação de volume é 1055,4 kg. O perfil de desgaste do rolo 4 é mostrado abaixo no gráfico 9.

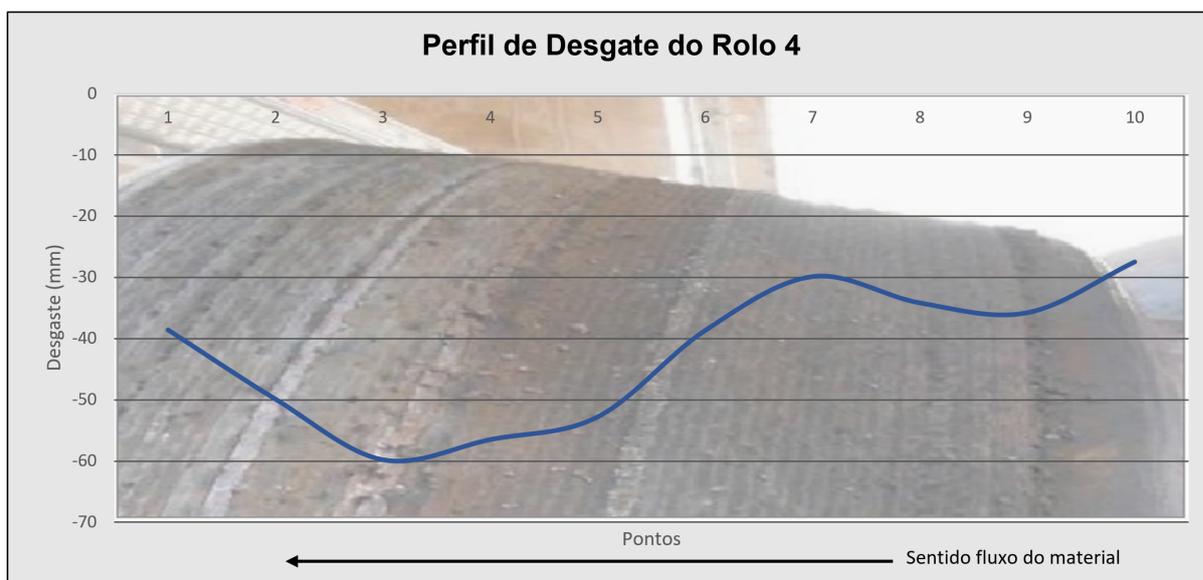


Gráfico 9 – Perfil de Desgaste do Rolo 4 (Campanha 2)

Fonte: Elaborado pelo Autor, 2018.

4.3.5 Análise da mesa de moagem durante a segunda campanha: empresa B

Os valores das medições efetuadas na mesa são mostrados na tabela 10. O modo de calcular a perda de material também foi realizado de maneira análoga ao que foi feito para a primeira campanha.

LEITURAS REALIZADAS – MESA (mm)												
Pontos	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	Média
23/08/16	60,8	74,0	64,9	61,5	61,3	63,7	62,6	63,9	68,9	71,8	67,3	65,5
14/09/16	62,4	74,0	67,5	67,5	68,8	70,0	68,9	68,3	74,8	75,1	73,0	70,0
28/09/16	62,4	74,0	67,5	67,5	68,8	70,0	71,6	74,8	83,0	83,5	73,1	72,4
11/10/16	66,2	74,0	74,7	77,3	79,2	82,7	83,7	86,6	91,3	86,9	77,0	80,0
26/10/16	68,8	74,4	79,1	82,0	83,2	85,7	88,0	90,9	95,7	93,0	79,5	83,7
21/11/16	73,1	79,8	85,6	83,2	87,2	87,6	93,9	98,9	101,1	95,3	80,5	87,8

Tabela 10 - Medições do desgaste da mesa do moinho ao longo da segunda campanha
Fonte: Elaborado pelo autor, 2018

A partir destes valores calcula-se a perda de material devido ao desgaste na mesa, Por meio das medições inicial e final tem-se a altura perdida devido ao desgaste, que corresponde a 22,3 mm, assim, o volume de material perdido é:

$$V = \frac{\pi}{4} \cdot (3,68^2 - 2,257^2) \cdot 0,0223 = 0,148 \text{ m}^3$$

Multiplicando este volume pela densidade média do material, tem-se a quantidade de material perdido devido ao desgaste que equivale a 1161,5 kg, O perfil de desgaste da mesa é mostrado abaixo no gráfico 10.

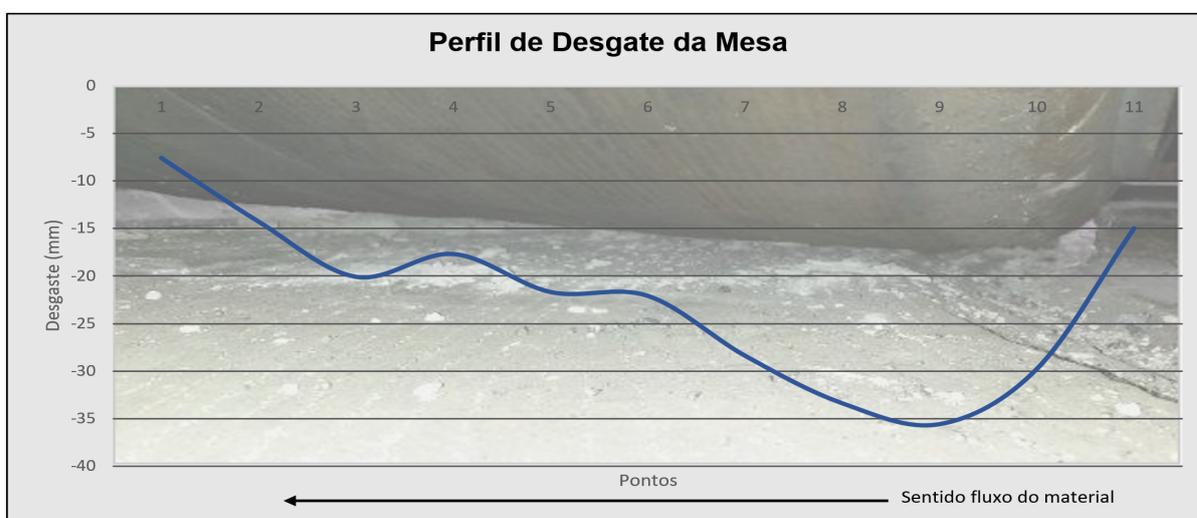


Gráfico 10 – Perfil de Desgaste da Mesa (Campanha 2)
Fonte: Elaborado pelo Autor, 2018.

4.2.6 Cálculo da taxa de desgaste para os rolos e mesa: empresa B

Somando as perdas de massa dos quatro rolos, a perda total equivale a 3112,1 kg de material, o que considerando a produção de farinha do período de 316218,6 toneladas corresponde a uma taxa de desgaste de 9,84 g/t.

Para a mesa, considerando a perda de massa de 1161,5 kg, a taxa de desgaste equivale a 3,76 g/t.

Considerando o desgaste do moinho como um todo, a perda de massa total durante essa campanha foi de 4373,6 kg, representando uma taxa de desgaste total de 13,5 g/t.

5 CONCLUSÕES

Ao analisar comparativamente as duas campanhas, primeiramente percebe-se que a primeira teve uma maior duração, assim, tem-se que o desgaste na segunda campanha foi mais agressivo. Apesar dos materiais aplicados possuírem a mesma especificação, concluiu-se que a faixa de variação dos componentes de liga permitidos pela AWS pode resultar em materiais com características de resistência diferentes a depender do fabricante.

Essa diferença resultou em comportamentos diferentes durante as duas campanhas. A taxa de desgaste na segunda campanha foi consideravelmente mais alta em relação à primeira campanha, sendo as taxas equivalentes a 13,5 g/t e 7,7 g/t, respectivamente. O primeiro valor representa uma perda de material por tonelada de farinha moída muito elevada, forçando uma parada prematura do moinho e prejudicando a produção da planta industrial.

Os perfis de desgaste dos rolos apresentam em sua maioria um padrão, no qual entre os pontos 3 e 5 observados nos Gráficos dos perfis de desgaste apresentados, o desgaste é mais acentuado. Isso acontece pois nessa área é onde acontecem os maiores esforços de moagem. Por este motivo, estes pontos são os mais críticos quanto à limitação de diminuição da camada de revestimento. O mesmo acontece com o perfil de desgaste da mesa, que é o mesmo nas duas campanhas, sendo os pontos a região mais crítica nesse caso, a área entre os pontos 7 e 9.

Apesar de apresentar padrões de desgaste semelhantes, os rolos não se desgastaram na mesma velocidade. Analisando os valores de massa perdida,

percebe-se que os rolos 3 e 4 foram os mais afetados. Isto acontece, pois o moinho apresenta dois dutos de entrada de ar, um de cada lado, buscando equilibrar a circulação do ar dentro do moinho. Entretanto, ele possui apenas uma saída de descarga de material, exatamente do lado dos rolos 3 e 4. Por esse motivo, ocorre acúmulo de material deste lado, o que restringe a passagem de ar ocasionando maior velocidade do gás quente. Estas velocidades elevadas acentuam drasticamente o desgaste nesse lado do moinho, como pode-se perceber analisando os valores dos rolos 1 e 4 comparativamente na segunda campanha, estes ficam posicionados em lados exatamente opostos, e o rolo 4 sofreu um desgaste praticamente 60% maior que o rolo 1 no período.

Conclui-se que a escolha do consumível de soldagem adequado é crucial para o bom desempenho do equipamento, e que esse material pode variar de um fabricante para o outro devido a variações na composição.

Como sugestão de material a ser utilizado tem-se a tecnologia que concilia insertos cerâmicos embutidos em insertos de alto cromo, por sua vez embutido em base de ferro dúctil. Essa combinação de materiais proporciona alta resistência ao desgaste devido aos insertos cerâmicos e ainda assim, resistência ao impacto devido à matriz dúctil. Acredita-se que um estudo futuro do comportamento deste material com as mesmas condições analisadas neste trabalho mostrará um aumento significativo do período produtivo entre uma parada e outra para recuperação.

6 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Associação Brasileira de Cimento Portland [ABCP], Indústria brasileira de cimento: Base para a construção do desenvolvimento / Confederação Nacional da Indústria, Associação Brasileira de Cimento Portland, – Brasília: CNI, 2012.

BAPTISTA, A,L,B,; NASCIMENTO, I,A, Revestimentos Duros Resistentes ao Desgaste Depositados por Soldagem Utilizados na Recuperação de Elementos de Máquinas, Spectru Instrumental Científico, 2009.

BUCHANAN, V, E,; SHIPWAY, P, H,; MCCARTNEY, D, G, Microstructure and abrasive wear behaviour of shielded metal arc welding hardfacings used in the sugarcane industry, International journal on Wear 263, 200.

BATISTA, M, Soldagem a ponto por resistência na Indústria Automotiva, Ed Novas Edições Acadêmicas, Março, 2015.

COSEGLIO, M, S, D, R, Caracterização de partículas abrasivas segundo diferentes modelos de medição de fator de forma, Monografia, Universidade Tecnológica Federal do Paraná - Engenharia Industrial Mecânica, Curitiba, p, 12-16, 2009.

DIN 50320: Verschleib- Begriffe, Analyse von Verschleibvorgängen, Gliederung des Verrschleibgebietes. Beut Verlag, Berlin 1979

ESAB, Apostila de Arames Tubulares, 2004, Disponível em <http://www.esab.com.br/br/por/Instrucao/biblioteca/upload/1901098rev0_ApostilaAramesTubulares.pdf>, Acessado em 28 de Maio de 2018.

EUTECTIC CASTOLIN, Disponível em: <<http://www.eutectic.com.br>>, Acesso em: 17 maio, 2018.

KOVAŘÍKOVÁ, I; SZEWCZYKOVÁ, B.; BLAŠKOVITŠ, P.; HODÚLOVÁ, E.; LECHOVIČ, E. Study and characterstic of abrasive wear mechanisms. Institute of Production Technologies, Faculty of Materials Science and Technology, Slovak University of Technology. Slovak Republic, 2009.

LIMA, Ademir C, et, al,, Soldagem de revestimentos duros em facas picadoras de cana-de-açúcar de indústria sucroalcooleira: eletrodo revestido “versus” arame tubular, In: CONGRESSO NORTE-NORDESTE DE PESQUISA E INOVAÇÃO - CONNEPI, 7,, 2012, Palmas, Anais,,Palmas: Instituto Federal do Tocantins, 2012.

LINCOLN ELECTRIC, Selection Guide to Lincoln Hardfacing Materials and Procedures, Disponível em <www.lincolnelectric.com/assets/US/EN/literature/C7710.pdf>, Acessado em 18 de Maio de 2018.

MACHADO, I, G, Soldagem & Técnicas Conexas: Processos, Editado pelo autor, Porto Alegre, RS, 1996.

MICALLI JR et al, Manual de Tecnologia de Fabricação e Soldagem, Núcleo de Tecnologia de Soldagem & Qualidade, São Paulo, SP, 2002.

MICHEL, Alain; BOUQUIN, Benoit. The smart welding concept. Global Clement: Wear Protection. Global Clement Magazine. Maio, 2017.

MILLER, B, Frequently asked questions about hardfacing, Março, 2005, Disponível em <<https://www.thefabricator.com/article/cuttingweldprep/frequently-asked-questions-about-hardfacing>>, Acessado em 19 de Maio de 2018.

MODENESI, P, J,, MARQUES, P, V, Soldagem I, UFMG, Belo Horizonte, Novembro, 2012.

OLIVEIRA, G, A, R, N, Critérios de projetos para Moinhos De Cimento Portland, Univerisdade Federal do Rio de Janeiro, Janeiro, 2012.

PRADEEP, G,R,C,; RAMESH, A,; DURGA PRASAD, B,, A Review Paper on Hard Facing Processes and Materials, International Journal of Engineering Science and Technology vol 2(11), 2010, 6507 -6510,

PITZER, M, J, de O,; CUZZIOL, R,; FREITAS, M, J,; MARAIA, J, P,; SILVA, A, B,, Recuperação de mesa e rolos dos moinhos de carvão pulverizado da Companhia Siderúrgica Paulista – COSIPA, **Anais do XXI Congresso Brasileiro de Manutenção da Associação Brasileira de Manutenção – ABRAMAN**, Aracaju, Setembro, 2006.

QUITES, A, Definição de soldagem, 2011, Disponível em <www.soldasoft.com.br>, Acessado em 25 de Maio de 2018.

RADI, P, A,; SANTOS, L, V,; BONETTI, L, F,; VLADIMIR J, TRAVA-AIROLDI, Tribologia, conceitos e aplicações, 13^o ENCONTRO DE INICIAÇÃO CIENTÍFICA E PÓS-GRADUAÇÃO DO ITA, 2007, São José dos Campos, SP, **Anais do 13^o Encontro de Iniciação Científica e Pós-Graduação do ITA – XIII ENCITA**, São José dos Campos, SP, Outubro, 2007.

WORRELL, E,; MARTIN, N,; PRICE, L, Potentials for energy efficiency improvement in the US cement industry, Energy Analysis Department, Environmental Energy Technologies Division, MS90-4000, Ernest Orlando Lawrence Berkeley National Laboratory, One Cyclotron Road, Berkeley, CA 94720, USA, November, 1999.

