

## ANÁLISE DAS PROPRIEDADES DOS REVESTIMENTOS APLICADOS NO AÇO HARDOX® 450 EM DENTES DE CAÇAMBA SUJEITAS À ABRASÃO E IMPACTO NA MINERAÇÃO

Daniel Junio Severino Ferreira Pinto, danieljsfp2010@gmail.com<sup>1</sup>  
Ana Luiza Ramos Ferreira, analuiza\_ramosferreira@hotmail.com<sup>1</sup>  
Elhadji Cheikh Talibouya Ba, cheikh.ba4640@hotmail.com<sup>3</sup>  
Paulo Sérgio Martins, paulo.martins@prof.una.br<sup>2</sup>  
Cíntia Dayhane de Abreu Martins, cinthiadayanne1@hotmail.com<sup>1</sup>  
Thayná Orcines da Silva Couto, thaynaosc@gmail.com<sup>1</sup>  
Carlos Alberto de Sousa Neves, casnevesengmecanico@gmail.com<sup>2</sup>  
Diego Barbosa Pratis Santos, diegopratis@gmail.com<sup>2</sup>  
Pedro Américo Almeida Magalhães Júnior, pamerico@pucminas.br<sup>2</sup>  
Miriane Cristina Silva Souza, mirianesouza@live.com<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Centro Universitário UNA, Engenharia Mecânica, Rua dos Aimorés 1451, Lourdes, CEP: 30140-071, Belo Horizonte, Minas Gerais – Brasil

<sup>2</sup>Pontifícia Universidade Católica de Minas Gerais, Engenharia Mecânica, Av. Dom José Gaspar, 500, Coração Eucarístico, CEP: 30535-901, Belo Horizonte, Minas Gerais – Brasil

<sup>3</sup>Universidade Federal de Minas Gerais, Engenharia Mecânica – Av. Pres. Antônio Carlos, 6627, Pampulha, CEP: 31270-901, Belo Horizonte, Minas Gerais – Brasil.

**Resumo.** A necessidade de reduzir tempo e custo de manutenção dos equipamentos de mineração, em especial nos dentes de escavadeira hidráulica é de grande importância, pois devido ao contato dos dentes com o minério há um grande desgaste nos mesmos e por isso são necessários realizar reparos para a continuidade do funcionamento e produção. Este trabalho busca analisar as propriedades que influenciam no desgaste dos mesmos, e avaliar alguns materiais que podem ser utilizados para o revestimento, ou seja, a deposição de uma camada extra de material, buscando maior durabilidade e eficiência no trabalho, sendo propostos o aço inoxidável, aço ferramenta e revestimento duro. O revestimento foi realizado em corpos de prova com dimensões de 76,2 x 25,4 x 12,7 mm fabricados com aço Hardox® 450 que é definido como o aço base. O revestimento foi feito pelo processo de soldagem com eletrodo revestido utilizando os consumíveis MASTER 600KB, MASTER 15/4 e MASTER 830. A avaliação foi feita por comparação de durezas e resistência ao desgaste que é obtida através do ensaio de desgaste abrasivo por roda de borracha com areia seca, padronizado pela norma ASTM G65 e teste de dureza pela norma ABNT NBR 6671.

**Palavras chave:** Desgaste abrasivo, dureza, eletrodo revestido, soldagem.

### 1. INTRODUÇÃO

Atualmente a produção de minério tem grande importância na economia do Brasil e também no mundo. O último dado informado pelo IBRAM (Instituto Brasileiro de Mineração) aponta que no ano de 2016 o Brasil exportou o volume de 394 milhões de toneladas de produtos minerais que significou US\$ 24 bilhões de dólares na economia. Sendo assim, há uma grande movimentação na produção desse bem mineral, principalmente na exportação. Empresas investem bilhões de reais em equipamentos para garantir uma produção lucrativa (IBRAM, 2017).

A produção de minério da Vale na mina de Carajás, por exemplo, inicia-se com a extração na mina, em seguida o transporte para britagem, seguido por peneiramento, estocagem e pelo transporte realizado por trem até o porto onde é realizado o embarque para exportação. Na extração do minério são utilizados diversos equipamentos, como caminhões fora de estrada que podem carregar até 400 toneladas, perfuratrizes, motoniveladoras, escavadeiras, entre outros. O equipamento responsável por retirar o material da mina e colocar no caminhão ou correias de transporte é a escavadeira. A extração do minério é um processo que gera muito desgaste, impacto e atrito, principalmente na caçamba da escavadeira (VALE, 2018).

Segundo a American Society for Testing and Materials (ASTM) o desgaste é definido como a degradação da superfície de um sólido devido ao movimento relativo de outra superfície, causando perda de material. Para a ABNT o desgaste é segundo a NBR 12042 “é a desagregação superficial e remoção de partículas de um determinado material submetido à força de atrito” (ABNT, 2012).

O desgaste também pode ser definido segundo Castro (2010) apud Lima (2008) de forma geral como uma mudança de dimensões através de uma perda de material de uma superfície em contato com outra em movimento. Os mecanismos de desgaste segundo a norma DIN 50320 são os desgastes abrasivo, adesivo, por fadiga de superfície e por reação triboquímicas como mostrado na Fig. 1.

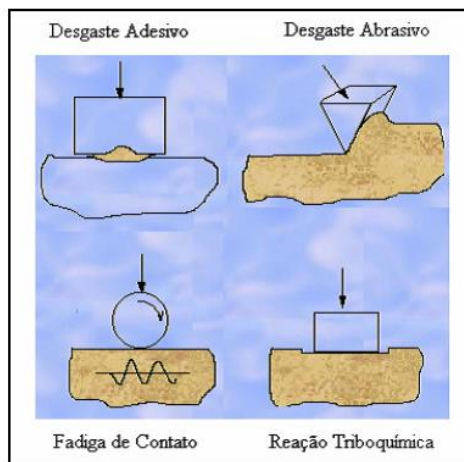


Figura 1. Mecanismos de desgaste segundo norma DIN 50320

O desgaste abrasivo é definido como um “fenômeno que ocorre quando partículas duras deslizam ou são forçadas contra uma superfície metálica em relação à qual estão em movimento, provocando por deslocamento ou amassamento a remoção do material” (RIBEIRO, 2004 apud RAMALHO, 1997).

Segundo Ribeiro (2004) apud Kassim (2000) o desgaste abrasivo é o responsável por 50% das falhas de equipamentos e seus componentes.

A recuperação de um componente metálico (sejam eles dentes, sapatas, facas, entre outros) pelo processo de soldagem, em equipamentos de mineração (escavadeira) consiste segundo Brantis (1993) em uma “deposição de um consumível de soldagem com características em geral mais nobres ao metal base, visando aplicações específicas como maiores durezas, resistência ao desgaste” e que o metal base sem esse revestimento não teriam o mesmo desempenho, ou seja, uma camada extra de material definida como “revestimento”. Atualmente, visando otimizar a vida útil desses revestimentos, diversos materiais têm sido aplicados e avaliados para que a recuperação seja mais rápida e com menor valor gasto.

Sendo assim, este trabalho teve como objetivo comparar e avaliar as propriedades mecânicas de dureza e a resistência ao desgaste abrasivo dos materiais aço ferramenta, inoxidável e revestimento duro aplicado no aço Hardox® 450 que são utilizados em dentes de caçambas de escavadeiras para mineração, aplicados por soldagem pelo processo de eletrodo revestido (SMAW), também foi avaliado a viabilidade dos revestimentos propostos verificando os custos aplicados em relação aos benefícios e durabilidade dos mesmos.

## 2. PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

Estabeleceu-se a aquisição de doze corpos de prova do aço Hardox® 450 três para cada material que foi realizado o processo de soldagem e mais três do material base. As dimensões definidas foram de 76,2 x 25,4 x 12,7 mm, medidas de comprimento, largura e espessura. O procedimento experimental consistiu em realizar a soldagem por eletrodo revestido (SMAW) de nove corpos de prova, três com consumível de aço inoxidável, três com consumível de revestimento duro e mais três com o consumível de aço ferramenta, e comparar a resistência ao desgaste abrasivo e dureza entre eles e também com o aço base que foram classificados em grupos como podemos observar na tabela 1.

Tabela 1. Marcação dos corpos de prova

| Numeração dos corpos de prova  |     |     |     |
|--------------------------------|-----|-----|-----|
| Aço base com revestimento duro | A-1 | A-2 | A-3 |
| Aço base com aço inoxidável    | B-1 | B-2 | B-3 |
| Aço base com aço ferramenta    | C-1 | C-2 | C-3 |
| Aço base (Hardox® 450)         | D-1 | D-2 | D-3 |

Outras informações sobre os materiais utilizados: Grupo A – revestimento duro, classificação DIN 8555 E 6-60, dureza de 60 HRC e densidade de 7,8 g/cm<sup>3</sup>; Grupo B – aço inoxidável, classificação AWS A5.4/A5.4M E420-15, dureza de 45

HRC e densidade de 7,7 g/cm<sup>3</sup>; Grupo C – aço ferramenta, classificação DIN 8555 E3-55 ST, dureza de 57 HRC e densidade de 7,85 g/cm<sup>3</sup>; Grupo D – aço base, Hardox<sup>®</sup> 450, dureza de 45 HRC e densidade de 7,8 g/cm<sup>3</sup>.

## 2.1. Preparação e procedimento de soldagem

O procedimento de soldagem foi realizado na superfície dos corpos de prova após a união dos três corpos do mesmo grupo, a espessura final encontrada foi de quatro milímetros. O consumível utilizado foi o eletrodo revestido com o diâmetro de 3,25 mm. Abaixo podemos observar o desenho esquemático do processo de soldagem.

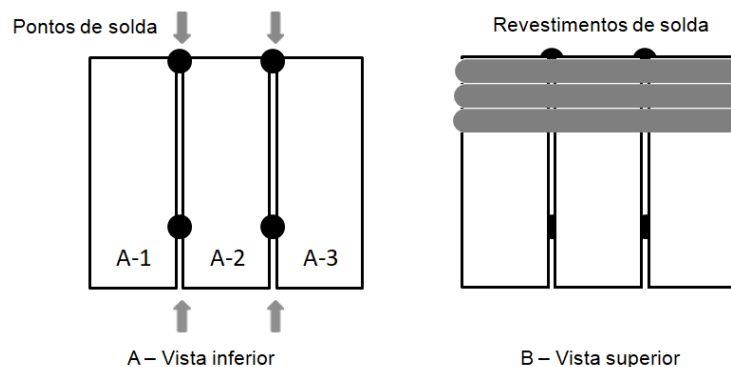


Figura 2. Desenho esquemático da união dos corpos de prova (A) e do revestimento de solda (B)

Após o procedimento de soldagem, os corpos de prova foram submetidos ao processo de fresamento, acabamento e separação para dar seguimento aos ensaios propostos.

## 2.2. Metodologia dos ensaios

A metodologia consistiu nos ensaios de dureza e de desgaste abrasivo. O ensaio de dureza segundo a norma ABNT NBR 6671 utiliza a escala Rockwell C com o equipamento DT-10 Durotwin do laboratório de análises da empresa Metalterm, foi utilizado o penetrador cone de diamante de 120° e 150 kgf de força. Em cada corpo de prova foi feito três pontos de dureza conforme Fig. 3, obtendo-se nove medições de dureza para cada grupo de corpos de prova para calcular o valor médio de dureza encontrado.

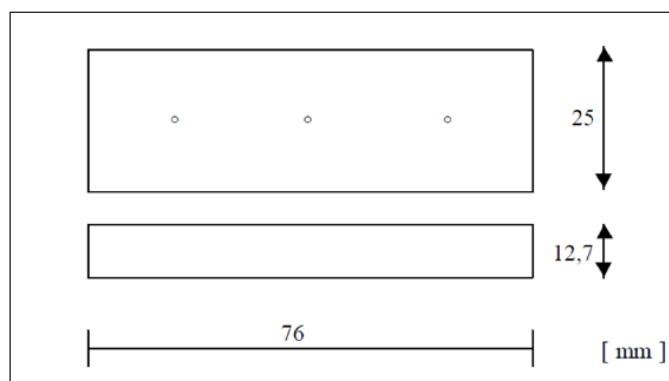


Figura 3. Localização dos pontos no ensaio de dureza (Castro, 2010) (ADAPTADO)

O ensaio de desgaste abrasivo foi realizado de acordo com a norma ASTM G65, o equipamento utilizado foi o abrasômetro tipo roda de borracha com o abrasivo utilizado a areia normal brasileira de granulometria 100. Para o ensaio foi fabricado com aço A-36 a roda e revestida com borracha natural com dureza de 60±5 Shore A. Outros parâmetros definidos foram que o fluxo de areia foi 360 g/min, carga aplicada de 130N, comprimento linear que foram percorridos no ensaio de 1436m, rotação do eixo do motor em 200rpm e tempo do ensaio de 10 minutos.

O ensaio foi realizado nos doze corpos de prova e a avaliação foi feita através da diferença de massas dos corpos de prova antes e depois do ensaio utilizando uma balança digital, sendo assim a perda de massa (Pm) é calculada através da Eq. (1).

$$Pm = m_i - m_f \quad (1)$$

Onde  $Pm$  é a perda de massa medida em quilogramas (kg),  $m_i$  é a massa inicial e  $m_f$  é a massa final, medidas em quilogramas (kg).

Não foi necessário realizar uma correção no valor da perda de massa, pois, quando os testes foram realizados o diâmetro da roda de borracha não reduziu por causa do desgaste com o abrasivo.

Assim, conforme Castro (2010) para facilitar a comparação com outros materiais é necessário converter a perda de massa em perda volumétrica em milímetros cúbicos para encontrar a resistência ao desgaste, para isso foi utilizado as Eq. (2) e (3).

$$Pv = (Pm/\gamma) * 1000 \quad (2)$$

$$Q = D/Pv \quad (3)$$

Onde  $Pv$  é a perda de volume ( $\text{mm}^3$ ),  $\gamma$  é a densidade do material ( $\text{g/cm}^3$ ),  $Q$  é a resistência ao desgaste ( $\text{m/mm}^3$ ) e  $D$  é a distância percorrida no ensaio (m).

### 3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

A figura abaixo mostra os corpos de prova após o procedimento de soldagem com o eletrodo revestido.



Figura 4. Corpos de prova do grupo A (esquerda), grupo B (centro) e grupo C (direita)

Após o processo de fresamento, de separação e acabamento as peças ficaram prontas para serem submetidas aos ensaios propostos como podemos observar na figura 5.



Figura 5. Corpos de prova separados

Os ensaios de dureza Rockwell na escala C apresentaram os seguintes resultados de dureza médios conforme figura abaixo.

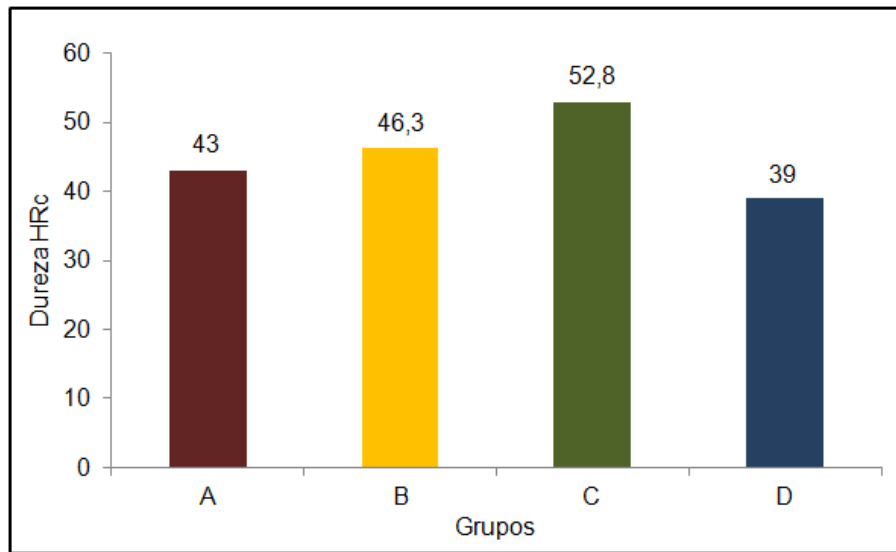


Figura 6. Valores médios de dureza após os ensaios

Após os ensaios foram calculados com as equações 1 e 2 e foi obtido os seguintes valores médios de perda de massa e perda volumétrica como podemos observar na figura abaixo.

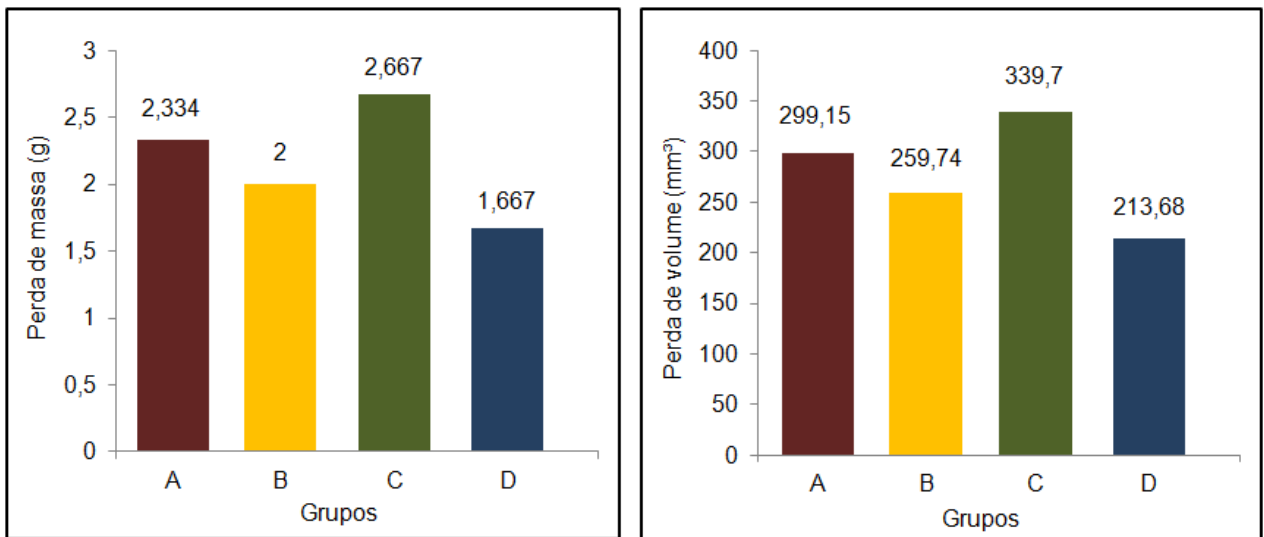


Figura 7. Valores médios de perda de massa (d) e perda de volume (e) após os ensaios de desgaste abrasivo

Sendo assim, é possível observar que o grupo C teve os maiores resultados de perda de massa e volume. Utilizando a Eq. (3) foram calculados os valores médios de resistência ao desgaste, como é observado abaixo.

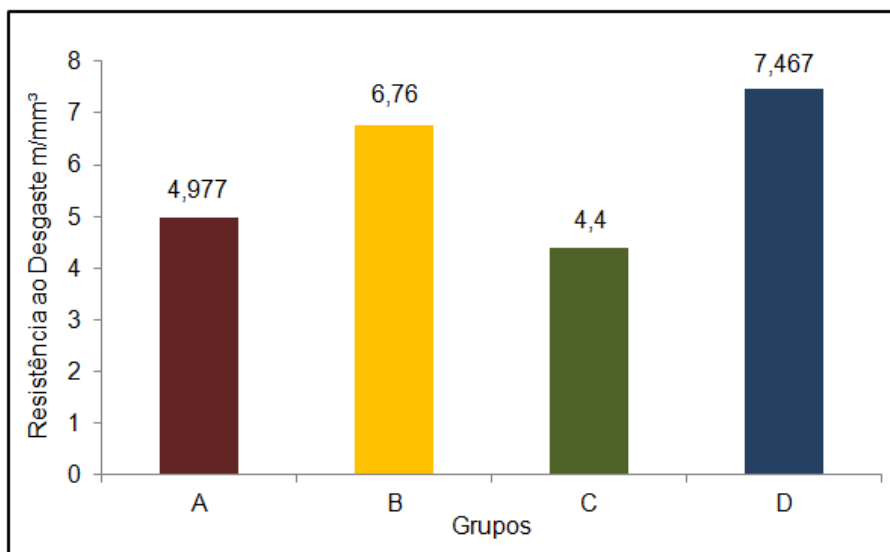


Figura 8. Valores médios da resistência ao desgaste após os ensaios

De acordo com a figura é observado que o grupo D, aço base sem revestimento teve o melhor resultado de resistência ao desgaste, seguido pelo grupo B, aço inoxidável.

#### 4. CONCLUSÃO

Comparando as durezas obtidas com o ensaio podemos observar que o grupo B teve a dureza satisfatória alcançando o valor do certificado, o grupo C e D apresentaram durezas abaixo do certificado, mesmo assim são considerados. O grupo A apresentou um valor de dureza bem abaixo do certificado.

Em relação à resistência ao desgaste abrasivo, podemos concluir que o material mais resistente ao desgaste foi o material base Hardox® 450 (grupo D), seguido pelo aço inoxidável (grupo B). Os grupos A e C apresentaram o menor valor de resistência ao desgaste.

Avaliando a dureza e resistência ao desgaste foi observado que o Aço Hardox® 450 (grupo D) tem as propriedades melhores em comparação com os revestimentos realizados. O grupo revestido que obteve melhores propriedades foi o grupo B, do aço inoxidável.

Avaliando a relação de custo e benefício do revestimento do aço Hardox® 450 considerando os custos de mão de obra, equipamentos, preenchimento do eletrodo revestido, energia e somente variando o preço do eletrodo consumível (grupo A R\$27,00/kg, grupo B R\$45,00/kg e grupo C R\$70,00/kg) podemos considerar inviável o revestimento pelo processo de soldagem uma vez que o custo para realizar o processo não gera propriedades finais favoráveis para a aplicação em dentes de escavadeira.

#### 5. AGRADECIMENTOS

Esta seção, opcional, deve ser posicionada antes da lista de referências.

#### 6. REFERÊNCIAS

- American Society for Testing and Materials. ASTM G65: Test Method for Measuring Abrasion using dry/stand rubber wheel apparatus. West Conshohocken, 2001.
- Associação Brasileira de Normas Técnicas. ABNT NBR 12042:2012. Materiais inorgânicos – Determinação do desgaste por abrasão, 2012.
- Brantis, Fernando César Aguiar. Efeitos dos parâmetros do processo de soldagem nas propriedades do revestimento. Tese de mestrado, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 1993.
- Castro, Cristóvão Américo Ferreira de. Resistência ao desgaste abrasivo das sapatas de trator de esteira após processo de recuperação. Tese de mestrado, Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Curitiba, 2010.
- Deutsches Institut für Normung DIN 50320. Análise sistemática dos processos de desgaste. Classificação dos fenômenos de desgaste, Metalurgia & Materiais, 53p. 1997, p 619-622.
- IBRAM, 2017. “Relatório anual de atividades, junho 2016 a junho 2017”. 14 Mar. 2018 <[http://portaldamineracao.com.br/ibram/wp-content/uploads/2017/08/WEB\\_REL\\_IBRAM\\_2017](http://portaldamineracao.com.br/ibram/wp-content/uploads/2017/08/WEB_REL_IBRAM_2017)>.

- Kassim S. Al-Rubaie, 2000. "Equivalent hardness concept and two-body abrasion of iron-base Alloys". *Wear*, Vol. 243, p. 92-100.
- Lima, Aldemi Coelho. Estudo da aplicação de revestimento duro por soldagem com arames tubulares quanto à resistência ao desgaste de facas picadoras de cana-de-açúcar. Tese de doutorado, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2008.
- Ramalho, José Pinto, 1997. "Revestimento por Soldagem". *Coleção Tecnologia SENAI – Soldagem*, p. 315-336.
- Ribeiro, Rubens. Avaliação da resistência ao desgaste abrasivo de revestimentos soldados do tipo Fe-C-Cr utilizados na indústria sucroalcooleira. Tese de mestrado, Universidade Estadual Paulista, Ilha Solteira, 2004.
- VALE, 2018. "Mineração: Minério de ferro e pelotas". 15 Mar. 2018  
<<http://www.vale.com/brasil/PT/business/mining/iron-ore-pellets/Paginas/default.aspx>>.

## 7. RESPONSABILIDADE PELAS INFORMAÇÕES

Os autores são os únicos responsáveis pelas informações incluídas neste trabalho.

# ANALYSIS OF THE PROPERTIES OF THE COATINGS APPLIED TO HARDOX® STEEL IN BUCKET TEETH SUBJECT TO ABRASION AND IMPACT ON MINING

Daniel Junio Severino Ferreira Pinto, [danieljsfp2010@gmail.com](mailto:danieljsfp2010@gmail.com)<sup>1</sup>  
Ana Luiza Ramos Ferreira, [analuiza\\_ramosferreira@hotmail.com](mailto:analuiza_ramosferreira@hotmail.com)<sup>1</sup>  
Elhadji Cheikh Talibouya Ba, [cheikh.ba4640@hotmail.com](mailto:cheikh.ba4640@hotmail.com)<sup>3</sup>  
Paulo Sérgio Martins, [paulo.martins@prof.una.br](mailto:paulo.martins@prof.una.br)<sup>2</sup>  
Cíntia Dayhane de Abreu Martins, [cinthiadayanne1@hotmail.com](mailto:cinthiadayanne1@hotmail.com)<sup>1</sup>  
Thayná Orcines da Silva Couto, [thaynaosc@gmail.com](mailto:thaynaosc@gmail.com)<sup>1</sup>  
Carlos Alberto de Sousa Neves, [casnevesengmecanico@gmail.com](mailto:casnevesengmecanico@gmail.com)<sup>2</sup>  
Diego Barbosa Pratis Santos, [diegopratis@gmail.com](mailto:diegopratis@gmail.com)<sup>2</sup>  
Pedro Américo Almeida Magalhães Júnior, [pamerico@pucminas.br](mailto:pamerico@pucminas.br)<sup>2</sup>  
Miriane Cristina Silva Souza, [mirianesouza@live.com](mailto:mirianesouza@live.com)<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Centro Universitário UNA, Engenharia Mecânica, Rua dos Aimorés 1451, Lourdes, CEP: 30140-071, Belo Horizonte, Minas Gerais – Brazil

<sup>2</sup>Pontifícia Universidade Católica de Minas Gerais, Engenharia Mecânica, Av. Dom José Gaspar, 500, Coração Eucarístico, CEP: 30535-901, Belo Horizonte, Minas Gerais – Brazil

<sup>3</sup>Universidade Federal de Minas Gerais, Engenharia Mecânica – Av. Pres. Antônio Carlos, 6627, Pampulha, CEP: 31270-901, Belo Horizonte, Minas Gerais – Brazil.

**Abstract.** *The need to reduce time and cost of maintenance of mining equipment, especially in hydraulic excavator teeth is of great importance, because of the contact of the teeth with the ore there is great wear and tear on them and therefore it is necessary to make repairs for the continuity of operation and production. This work aims to analyze the properties that influence the wear of the same and evaluate some materials that can be used for the coating, that is, the deposition of an extra layer of material, seeking greater durability and efficiency at work, being proposed the stainless steel, tool steel and hard coating. The coating was performed on specimens measuring 76.2 x 25.4 x 12.7 mm made of Hardox® 450 steel which is defined as the base steel. The coating was done by the coated electrode welding process using the MASTER 600KB, MASTER 15/4 and MASTER 830 consumables. The evaluation was made by comparison of hardness and wear resistance that is obtained through the abrasive wear test by rubber wheel with dry sand, standardized by ASTM G65 and hardness test by ABNT NBR 6671.*

**Keywords:** Abrasive wear, hardness, coated electrodes, welding.

## RESPONSIBILITY NOTICE

The authors are the only responsible for the printed material included in this paper.