

Análise de desgaste em ferramentas de moagem aplicadas à indústria de processamento de cacau

Santos DVJ*, Silva FS*, Medeiros LI* e Medeiros NCFL*

**Universidade Estadual de Santa Cruz, departamento de engenharia mecânica, Ilhéus, Ba, Brasil.*

Resumo. Este trabalho visa investigar porque certos tipos de ferramentas de moagem de cacau, conhecidos como martelos, resistem ao desgaste mais do que outros. Martelos são ferramentas de pequeno porte em formato de pêndulo constituídos do seu revestimento feito usualmente de metal duro (WC-Co) e do seu corpo feito em aço carbono que são severamente desgastadas durante o processo de pulverização de torta de cacau. Este trabalho buscou entender o porquê de martelos de três empresas fornecedoras sob as mesmas especificações técnicas solicitadas por uma certa empresa cliente variam tanto em durabilidade entre si. O estudo consistiu da análise das condições de desgaste, qualificação dos mecanismos de desgaste, coleta de espécimes *in loco* e caracterização dos substratos. Os resultados mostraram duas das empresas apresentarem lotes que resistem consideravelmente mais em relação às taxas de desgaste percentual registradas. Os lotes de todas as empresas apresentaram defeitos superficiais como trincas e/ou defeitos de soldagem que podem vir a comprometer a durabilidade do material, entretanto, somente uma empresa apresentou resultados comprometedores. A variação de composição química também foi considerável, principalmente no nível de cobalto do revestimento. É sugerido estudos mais aprofundados isolando todas as variáveis para obter resultados mais precisos sobre as condições determinantes da falha.

Palavras-chave. *Martelos, moagem, processamento de cacau, desgaste, caracterização, durabilidade.*

Introdução. Os componentes em análise neste estudo são conhecidos como martelos, pequenas ferramentas em forma de pêndulo que são acopladas em moinhos pulverizadores específicos. Estes equipamentos são responsáveis pela pulverização da torta de cacau – muito parecida com o pó de cacau, porém mais densa – que resulta no pó propriamente dito. Os moinhos pulverizadores giram a alta rotação que resulta em jatos de partículas de torta sendo direcionados perpendicularmente contra os martelos. A torta de cacau entra no equipamento por sua abertura inferior e é direcionado a extremidade através da força centrífuga oriunda da alta rotação, onde é pulverizada à medida que colide contra a chapa de desgaste e contra os martelos

Para facilitar o entendimento, a Figura 1 mostra um fluxograma genérico do processamento de amêndoas de cacau.

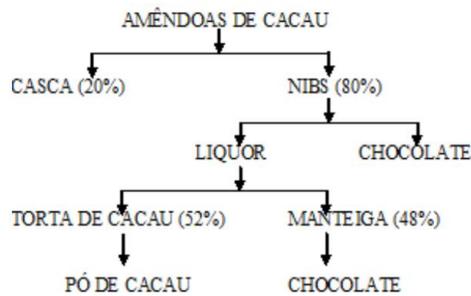


Figura 1. Fluxograma genérico do processamento de cacau (1).

Metal duro. Os martelos, modelo exibido na Figura 2, são constituídos do corpo, feito em algum tipo de aço carbono e o do revestimento que, por sua vez, é constituído usualmente de carboneto de tungstênio (WC-Co). O carbeto de tungstênio (WC) é a fase cerâmica do material que confere sua dureza enquanto o cobalto é a matriz metálica responsável pela tenacidade à fratura tornando-o altamente resistente contra o desgaste. Podem também haver outros carbetos como TaC, TiC, MoC, NbC, VC, HfC, ZrC ou Cr₃C₂ que dentre suas funções, são responsáveis por prover estabilidade química ao material (2).

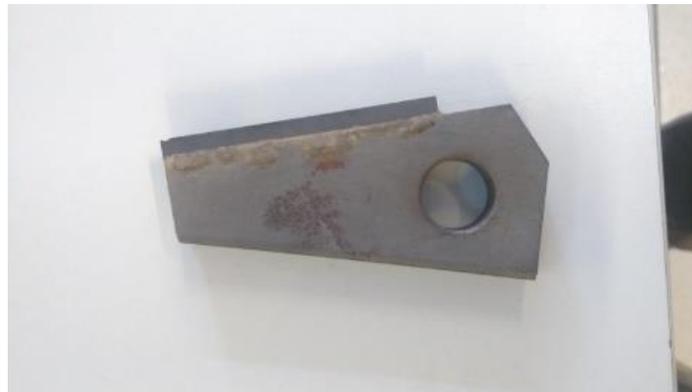


Figura 2. Martelo usado na pulverização de torta de cacau.

Quanto maior a contribuição de cobalto no material, menor será sua dureza e maior será sua tenacidade à fratura, em outras palavras, as propriedades oriundas da porção metálica do material serão mais evidentes (3). A união entre o corpo e o revestimento pode ser realizada por processos de brasagem e soldagem, trazendo consigo grandes chances de defeitos superficiais e/ou volumétricos.

Desgaste. Considera-se que um material tenha falhado quando não é mais capaz de exercer seu papel adequadamente. Desgaste é o dano produzido em uma superfície, causado pela interação com outra superfície. Consequentemente, é aceito como uma forma de fratura modificada por influências químicas secundárias, se relacionando diretamente com as propriedades mecânicas dos sólidos (4). Não existe consenso e/ou definição clara sobre quais são os tipos de desgaste,

entretanto uma classificação bastante aceita é a que separa os tipos de desgastes em 6 grupos: adesão, abrasão, erosão, fadiga de contato, cavitação e corrosão (5). Cerca de 50% dos problemas causados por desgaste na indústria tem origem abrasiva e é seguida por 15% dos problemas causados por desgaste adesivo (6,7).

Desgaste pode ser desejável ou não dependendo da sua aplicação. Mecanismos de “bom desgaste” são geralmente chamados de desgaste controlado e tem como exemplos escrita com lápis, usinagem e o barbear. Já em quase todas as aplicações de maquinário, desgaste não controlado é indesejável principalmente em máquinas rotativas causando desbalanceamento (8).

Especificamente o desgaste por erosão, que tem na Figura 3 sua esquematização, é tratado à parte do desgaste abrasivo devido a origem das suas tensões de desgaste que estão relacionadas à energia cinética das partículas a medida que se chocam contra a superfície sendo desgastada. A velocidade da partícula abrasiva e o ângulo de contato combinados com o tamanho da partícula fornecem a medida de energia cinética. Os resíduos de desgaste são originados da repetição destes impactos (8).

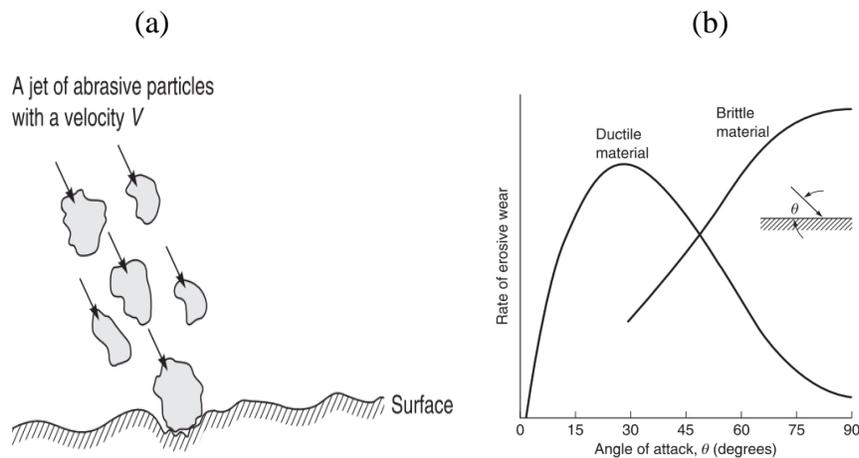


Figura 3. (a) Esquema de jato de partículas abrasivas atingindo uma superfície a alta velocidade e (b) influência do ângulo de contato na taxa de desgaste (8).

O desgaste por erosão é um problema extremamente indesejável em maquinário quando há impurezas (areia, poeira, etc.) em propulsores de aviões e helicópteros, turbinas, bombas e ventiladores. Entretanto, o caso é mais complexo quando o produto granuloso e abrasivo como a torta de cacau que é o principal elemento do processo e, portanto, não pode ser descartado. Nesta situação, desgaste erosivo não pode ser evitado, somente controlado.

Materiais e métodos. Foram coletados martelos dos respectivos fornecedores, representados neste trabalho pelas letras AR, DU e CM. Já os moinhos pulverizadores em que foram realizadas as observações de desgaste são do fabricante ARVOS©. O modelo é registrado como Moinho

Vertical Raymond 35” mostrado na Figura 4. O *tag* usado para o equipamento neste trabalho é MR.



Figura 4. Modelo de moinho a partir do qual os substratos foram extraídos (9).

Os martelos foram separados em lotes respectivos aos fabricantes e submetidos a condições de desgaste que obedeciam às logísticas de produção da fábrica em que foi realizado o estudo. Isto é, alguns martelos foram inseridos no mesmo moinho de torta, com o mesmo produto pela mesma quantidade de tempo, mas isto não pode ser garantido para todas as amostras.

A Tabela 1 traz informações importantes sobre o material do corpo e do revestimento. Traz também a composição química e dureza do revestimento informada por cada fabricante.

Tabela 1 – Tipos de materiais de construção dos martelos por fornecedor.

Empresa	Corpo	Revestimento	Comp. Quím	Dureza
CM	AISI 1513	WC-Co-TiC	WC – 85%; Co – 9,2%; TiC – 5,8%	89-90 HRA
AR	AISI 1020	WC-Co	WC – 90%; Co – 10%	90 HRC
DU	DIN 1.1191	WC-Co	WC – 90%; Co – 10%	HV30 – 1376

A nomenclatura utilizada nas ferramentas para estudo dos martelos é dada na forma XX-YY. Em que XX representa cada fornecedor e pode assumir os caracteres CM, AR ou DU. Já YY representa o número de cada lote, podendo assumir os valores 01,02,03 e assim sucessivamente. O número de cada lote está diretamente relacionado com o cenário de desgaste a que os espécimes foram submetidos. Um exemplo desta nomenclatura seria o *tag* CM-02 ou DU-01.

As condições de desgaste, exibidas na Tabela 2, são análogas a uma função de 3 variáveis: tempo de permanência no equipamento, receita do produto (torta de cacau) que está sendo moída, e qual dos 3 discos de moagem os martelos estão acoplados.

Tabela 2 – Parâmetros dos lotes por condições de desgaste.

Lotes	Disco de moagem	Moinho	Permanência (dias)
01	Inferior	MR03	Indeterminado
02	Superior	MR03	Indeterminado
03	Inferior	MR01	15
04	Superior	MR01	15
05	Inferior	MR01	17
06	Superior	MR01	17
07	Inferior	MR02	08
08	Superior	MR02	08

Os moinhos estão diretamente relacionados com os produtos, e conseqüentemente, com a abrasividade do processo. Existem uma variedade de receitas usadas no processo de produção de pós de cacau, entretanto, todas são resumidas em três grupos, sendo que, as responsáveis pelo maior desgaste obrigatoriamente são processadas no MR02 por razões internas, enquanto as demais são revezadas no MR01 e MR03 sem padrão definido. A direção de contato entre ferramenta de moagem e partículas de torta é o mais próximo possível de um ângulo perpendicular. Como as partículas adentram o moinho pela sua porção inferior, as que possuem maior quantidade de movimento colidem contra o revestimento das ferramentas localizadas no disco do extremo inferior do equipamento, e conseqüentemente, mais material é retirado destes martelos. Já a quantidade de dias, última variável, que as ferramentas permanecem nos equipamentos depende do planejamento de manutenção ou eventuais falhas.

Inicialmente, com cortadeira metalográfica (Figura 5a), seccionou-se transversalmente substratos abrangendo o revestimento, zona de soldagem e corpo da ferramenta. A limpeza do substrato foi feita por cerca de 10 minutos em banho de álcool isopropílico em ultrassom acompanhado de jato de ar comprimido para secagem.



Figura 5. (a) Cortadora e (b) politriz metalográfica usadas no trabalho.

Em seguida foi feito o embutimento do substrato em baquelite com auxílio de uma embutidora. Subsequentemente, foi realizado o lixamento com lixas d'água #220, #600 e #1200 em politriz metalográfica (Figura 5b). O polimento da superfície do substrato foi feito com de pasta de diamante 0,25 μm com auxílio de feltro e solução de álcool isopropílico também em politriz metalográfica. Por fim, para a caracterização por meio da tecnologia de microscopia eletrônica de varredura *field emission gun* (MEV-FEG), foi usado o microscópio da Figura 6, marca Tescan e modelo Mira 3, pertencente ao INPE – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais.

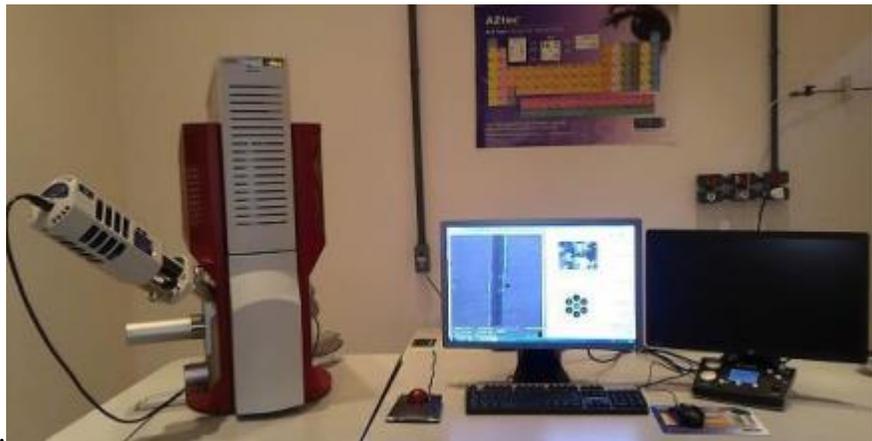


Figura 6. Microscópio eletrônico de varredura Tescan Mira 3 usado neste trabalho.

Resultados e discussão. Dado a alta rotação do equipamento, 3580 RPM, o que por sua vez imprime alta velocidade às partículas de torta de cacau além da natureza abrasiva dessas partículas, o mecanismo predominante é tido como desgaste erosivo. É possível a contribuição de outros mecanismos de desgaste, porém são considerados insignificantes comparados ao desgaste por erosão. A Tabela 3 traz os valores de massa aferida para cada espécime antes e após o desgaste acompanhada também da massa percentual desgastada em cada martelo.

Tabela 3 – Massas aferidas para cada grupo de amostras.

Fabricante	Massa inicial (g)	Massa pós-desgaste (g)	Desgaste percentual (%)	Permanência (dias)	Desgaste por dia (%)
AR-03	406,7	308,0	33,1	15	2,20
AR-04	406,7	315,7	22,4	15	1,50
AR-07	404,9	298,9	26,2	08	3,30
AR-08	404,9	352,6	12,9	08	1,60
DU-05	401,1	224,9	43,9	17	2,60
DU-06	401,1	283,3	29,4	17	1,70
CM-01	348,3	332,4	17	06	2,80
CM-02	348,3	339,1	12,7	06	2,11

Estes valores implicam no conceito de desgaste controlado, o qual os martelos da empresa CM, aparentam falhar. Em outras palavras, o percentual de desgaste desses martelos apesar de parecidos com as demais, acontece de maneira a provocar rápido desbalanceamento do equipamento rotativo, o que implica na troca frequente dessas ferramentas.

As amostras AR-03, AR-04, AR-07 e AR-08 foram coletadas com 08 dias excepcionalmente para avaliação interna da empresa, ou seja, anteriormente a sua falha propriamente dita. Em contrapartida, os martelos CM-01, CM-02, DU-05 e DU-06 foram coletados após relato de desbalanceamento do moinho, ou seja, após a falha dos martelos. Enquanto os martelos DU-05 e DU-06 foram substituídos após 17 dias com sua massa reduzida a quase metade do valor inicial mostrando desgaste controlando, os martelos CM-01 e CM-02 foram trocados com menos da metade do tempo necessário e com pouca perda de massa, indicando desgaste aleatório e baixa tenacidade a fratura.

Analisando a composição química de todos os substratos, obteve-se como resultados mais representativos os lotes CM-01 e DU-06 como mostrados na Figura 7 e 8, respectivamente. Ambas as Figuras informam a presença de tungstênio (W), carbono (C) e cobalto (Co). Tungstênio e carbono estão combinados na forma de carreto de tungstênio e são a matriz cerâmica do metal duro enquanto o cobalto é o metal que atua como elemento ligante. As Figuras 7 e 8 mostram discrepâncias opostas em relação a composição química. Enquanto a empresa CM diz fornecer carboneto de tungstênio (WC-Co) com 85% de carreto de tungstênio (WC), 9,2% de cobalto e 5,8% de carreto de titânio (TiC), a empresa DU diz fornecer o componente com 90% de carreto de tungstênio e 10% de cobalto. Entretanto, na prática, não foi encontrado sequer a presença de titânio no substrato CM-01 e o nível de cobalto é cerca de 3x menor do que o alegado. Já nas amostras da segunda empresa, todos os elementos alegados foram de fato encontrados, porém o valor de cobalto é cerca de 50% maior do que o informado.

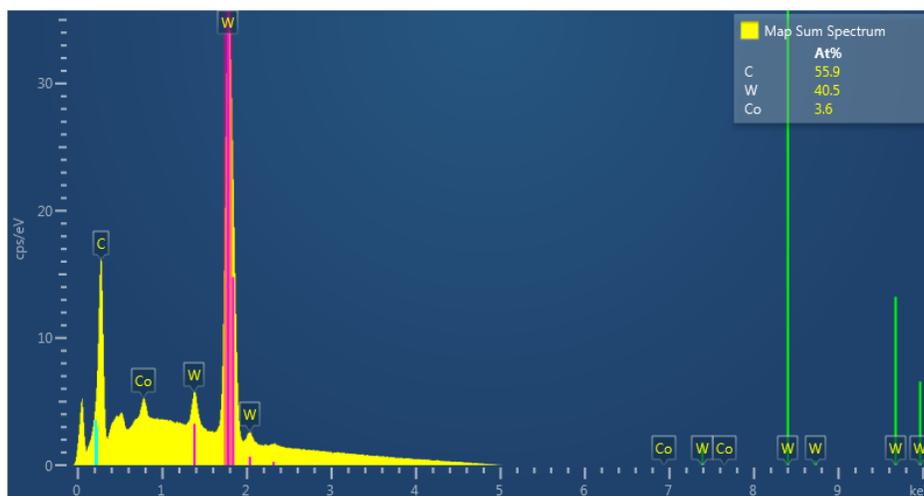


Figura 7. Espectro FEG do revestimento de WC do substrato CM-01 aumentada em 10000x.

Os espectros FEG dos demais substratos referentes ao fabricante AR e DU seguiram o padrão das discrepâncias da mesma natureza do substrato DU-06. O nível de cobalto é diretamente relacionado as propriedades do material, quanto maior sua porcentagem menor será sua dureza e maior será sua tenacidade à fratura, o que por sua vez sugere os motivos da falha prematura das ferramentas da empresa CM bem como da alta resistência ao desgaste das ferramentas DU e AR.

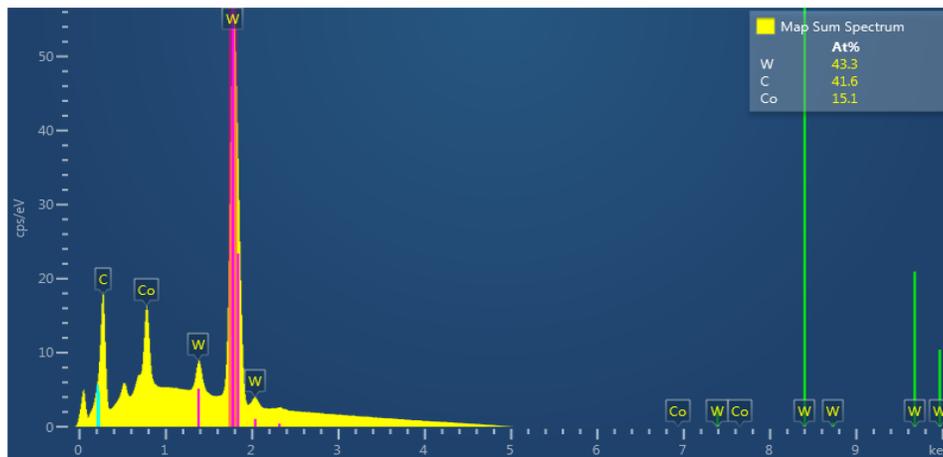


Figura 8. Espectro FEG do revestimento de WC do substrato DU-06 aumentada em 10000x

Ao investigar a interface corpo-revestimento das ferramentas, todos os substratos apresentaram trincas na sua interface e/ou defeitos na sua zona de soldagem como exibidas nos lotes CM-01 e CM-02, conforme exibidas na Figura 9.

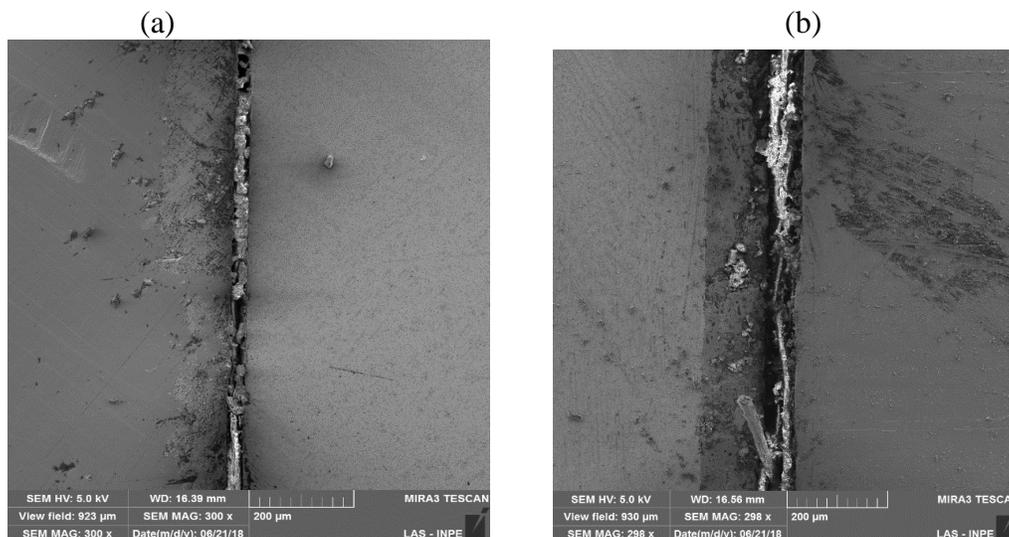


Figura 4. Imagem MEV da interface revestimento e corpo dos substratos (a) CM-01 e (b) CM-02 aumentada em 300x.

O único fator que difere as condições de desgaste dos substratos das Figuras 9a e 9b é a localização nos discos de moagem, a imagem da esquerda no disco inferior e a imagem da direita no disco intermediário. O que mais chama atenção nestas imagens, porém, é a quantidade de espaço não preenchido na interface. A falta de preenchimento pode ser oriunda do processo de união da ferramenta e pode ser um fator de concentração de tensões quando se analisa as tensões transmitidas entre partículas do jato de torta para a ferramenta que são transferidas através dos filmes de lubrificação aplicadas aos martelos.

Conclusão. Este trabalho procurou investigar e levantar as possíveis causas para variação da durabilidade dos martelos de três empresas que, em tese, produzem ferramentas de especificações semelhantes. Martelos estes que são aplicados no processo de pulverização de torta de cacau em uma fábrica processadora de cacau da região.

Em termos de desgaste sofrido no pior cenário, as empresas AR (2,2% e 3,3%) e DU (2,6%) obtiveram desempenho superior em relação as suas concorrentes ao que se refere às amostras coletadas. Os martelos das duas empresas resistiram por 15 e 17 dias, respectivamente, sendo que a primeira foi substituída antes da sua falha com 08 e 15 dias a depender do lote e a segunda resistiu por 17 dias sofrendo desgaste de maneira controlada. Já os martelos das empresas CM apesar de apresentar baixos valores de percentual de desgaste (3,4%), possui a vida útil baixa, suas ferramentas geralmente não ultrapassam 8 dias.

A análise de composição química dos martelos mostrou como o nível de cobalto pode influir na durabilidade do material. Os substratos CM apresentaram níveis de cobalto cerca de 3x menor do que o indicado. Como o nível de cobalto é proporcional ao valor de tenacidade à fratura e inversamente proporcional ao valor de sua dureza, é possível que esta discrepância seja responsável pela baixa ou alta durabilidade destas ferramentas.

A análise superficial de defeitos na interface corpo-revestimento mostrou que há certo nível de falta de preenchimento na interface nos substratos da empresa CM. Os martelos das empresas DU e AR, aparentemente, não tiveram sua durabilidade afetada pelos defeitos encontrados quando comparados com as ferramentas CM e com seus valores de desgaste percentual.

Para obter resultados mais precisos e definitivos referentes a influência do nível de cobalto no revestimento e a qualidade da interface revestimento-corpo seriam necessárias análises mais aprofundadas, que, privilegiem as análises de desgaste com parâmetros singulares, controlados de melhor forma.

Para continuação deste trabalho também é sugerido a investigação completa sobre abrasividade das partículas de torta de cacau para melhor entendimento e quantificação dos mecanismos de desgaste, invés de simplesmente qualificá-los. Seria importante, também, a realização de outros métodos de caracterização dos martelos como análises de perfilometria ótica da superfície dos revestimentos para análise da correlação de rugosidades com dureza e resistência ao desgaste.



Agradecimentos. Ao apoio e orientação de Leonardo Iusuti de Medeiros e Nila Cecília de Faria Lopes Medeiros durante a elaboração, a Universidade Estadual de Santa Cruz e ao Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais por prover os equipamentos e laboratórios para análise.

Nota de publicação. Os autores relatam que não há conflito de interesse neste trabalho.

Referências.

- (1) Mendes FAT, Lima EL. Perfil Agroindustrial do Processamento de Amêndoas de Cacau em Pequena Escala no Estado do Pará. Belém: SEBRAE/PA, 2007.
- (2) Milheiro FAC. Produção e caracterização de pós compósitos nano estruturados do metal duro WC-10Co por moagem de alta energia. Universidade Estadual do Norte Fluminense, Dissertação de Mestrado, Campos dos Goytacases, RJ (2006)..
- (3) Zengui Y. et al. Nano-grained Tungsten Carbide-Cobalt (WC/Co). Materials Modification, Inc. 2929 Eskridge Road, P-1, 1998.
- (4) Tier MAD. Avaliação da resistência ao desgaste do aço AISI M2 nitretado a plasma. 1998. 1656 f. Tese para obtenção do título de doutor em engenharia – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 1998.
- (5) Noble DN. Abrasive wear resistance of hardfacing weld deposits. Metal construction 17.9 (1985): 605-611.
- (6) Eyre TS. "Wear characteristics of metals. Tribology International 9.5 (1976): 203-212.
- (7) Eyre TS. "The mechanisms of wear. Tribology international 11.2 (1978): 91-96.
- (8) Bhushan B. Principles and applications of tribology. Second Edition. New York: John Wiley & Sons, 2013.
- (9) Raymond® vertical mill. Arvos Group website, 2014 [Internet]. Disponível em: <http://www.arvos-group.com/divisions/raymond-bartlett-snow/products/size-reduction-and-classification/vertical-mill/> Acesso em: 22 de novembro de 2017.