

DESENVOLVIMENTO DE ENSAIO LABORATORIAL PARA A PREVISÃO DE DESGASTE EM CIRCUITO DE PROCESSAMENTO MINERAL *

Eduardo Henrique Marsola Niño de Guzmán¹
Maurício Guimarães Bergerman²

Resumo

A abrasividade de um mineral ou rocha é um tema de extrema importância na indústria mineral e é medido geralmente pelo índice de abrasividade de Bond (AI). Entretanto o ensaio de Bond restringe as amostras tanto pela granulometria utilizada no ensaio, entre 1/2" e 3/4", como quanto pela massa, sendo necessários 1600 g, além do tempo de realização de aproximadamente 60 minutos. Visando o estudo de abrasividade de materiais mais finos, foi pensado no desenvolvimento de um ensaio LCPC modificado, utilizando granulometrias extremamente finas, da ordem de 1,0 mm ou menores, para previsão de desgaste em circuitos de beneficiamento mineral, antecipando assim possíveis falhas em função da mudança das características de abrasividade do material que está sendo processado, podendo ser utilizado para caracterizar materiais finos da etapa de prospecção, perfuração, pré-concentração, e fluxos da flotação.

Palavras-chave: Índice de Abrasividade de Bond (AI); LCPC; Abrasividade; desgaste.

DEVELOPMENT OF LABORATORY TEST FOR WEARING OUT ASSESSMENT IN MINERAL PROCESS CIRCUIT

Abstract

The mineral or rock abrasivity is a theme with extreme importance in the mineral industry and it is usually measured through the Bond Abrasiveness Index (AI). However, the test restrains the samples both for the granulometry used in the test, between 1/2" and 3/4", as well in mass, being necessary 1600 g for each test, beyond the time of about 60 minutes. Aiming the study of abrasiveness of fine materials, the objective of this paper is the development of an modified LCPC test, using fine granulometry, in the order of 1,0 mm or less, to predict the wear in mineral processing circuits, anticipating possible failures in function of the alteration of abrasiveness features of the material that is being processed, being able to use materials of the exploration stages, drilling, pre-concentration and flotation streams.

Keywords: Bond Abrasiveness Index (AI); LCPC; Abrasiveness.

¹ Graduando em engenharia de minas, Departamento de Engenharia de Minas e de Petróleo, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, São Paulo, Brasil.

² Professor Doutor, Departamento de Engenharia de Minas e de Petróleo, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, São Paulo, Brasil.

1 INTRODUÇÃO

A abrasividade de minerais e rochas é um tema de extrema relevância na indústria mineral e é estudado por diversos autores, com destaque na etapa de dimensionamento e seleção dos equipamentos e materiais utilizados na fabricação das máquinas e tubulações de transporte de minérios [1-6].

Abrasividade é a capacidade de um material, no nosso caso o mineral ou rocha, de polir, limpar ou desgastar outros materiais e é o mecanismo mais comum de desgaste de equipamentos industriais [1]. Por motivos como este se faz necessário o estudo desses mecanismos de desgaste e modos de medir essa abrasividade com resultados rápidos, precisos e confiáveis.

Atualmente o ensaio mais comum na indústria mineral para medir este parâmetro é o ensaio de abrasividade de Bond [6]. Apesar de ser uma referência no setor, ele necessita de 1600 g de amostra em uma granulometria entre $\frac{1}{2}$ " e $\frac{3}{4}$ " e demora cerca de uma hora para ser realizado.

O ensaio LCPC é uma alternativa ao ensaio padrão de Bond. Padronizado por uma norma francesa [7], ele é realizado com 500 g de material entre 6,3 mm e 4,0 mm e um tempo de ensaio de cinco minutos. Metso [8] e Peres [1] ilustram a boa correlação entre os resultados do A_i de Bond e o LCPC. Diversos autores ilustram a aplicação do LCPC na indústria mineral e as variáveis que podem impactar o ensaio [1-6; 9-12].

O tempo cerca de doze vezes menor (5 minutos do ensaio LCPC contra 60 minutos do ensaio de Bond) para obter o resultado e a massa, cerca de três vezes menor (500g do ensaio LCPC contra 1600g do ensaio de Bond), são fatos notáveis [7;13]. A granulometria, entretanto, continua sendo um limitador quando queremos obter resultados de abrasividade de minérios em estudos de pré-concentração mineral, geometurgia ou em produtos de prospecção, perfuração e flotação, cujas granulometrias são finas para o ensaio LCPC ou A_i de Bond. Por este motivo, o presente estudo visa desenvolver um ensaio alternativo ao LCPC utilizando granulometrias ainda mais finas que 4,0 mm, da ordem de 1,0 mm ou menores. Com esse ensaio será possível prever o desgaste em equipamentos de beneficiamento mineral e tubulações de transporte de materiais, antecipando assim possíveis falhas em função da mudança das características de abrasividade do material que está sendo processado.

1.1 ENSAIO DE ABRASIVIDADE DE BOND

O ensaio de abrasividade de Bond foi desenvolvido por Fred. C. Bond, e é um dos testes mais tradicionais da indústria mineral para determinação da abrasividade de um minério e também a referência quando se trata de abrasividade [1]. O teste de abrasividade de Bond utiliza material dentro da faixa granulométrica de $\frac{1}{2}$ " a $\frac{3}{4}$ ", muito maior que o utilizado no ensaio LCPC como visto no próximo tópico, e necessita de 1600 g de material fracionado em quatro porções de 400 g. Cada fração é inserida na em um tambor com uma placa de aço que sofrerá o desgaste e permanece em rotação por 15 minutos, quando o equipamento é desligado, limpo e outra fração é inserida e o equipamento é reiniciado, sendo o procedimento repetido até toda a massa de amostra ser utilizada. A massa retirada do equipamento, após o teste ter sido finalizado, é reunida e peneirada para análise da geração de finos.

A placa utilizada no ensaio fica fixada dentro do equipamento em rotação e é de aço SAE4330, tendo a sua massa medida antes do ensaio e após o ensaio, para

obtenção do índice AI de Bond, calculado pela diferença percentual entre as massas (Equação 1):

$$AI = (M_{\text{final}} - M_{\text{inicial}}) / 100 \quad (1)$$

O índice obtido neste ensaio, AI de Bond, sempre está entre 0 e 1 e indica o quão abrasivo o material analisado é: quanto mais próximo de 0, menos abrasivo, e conseqüentemente quanto mais próximo de 1, mais abrasivo é o material.

1.2 ENSAIO DE ABRASIVIDADE LCPC

O ensaio de abrasividade LCPC foi desenvolvido no *Laboratoire Central des Ponts et Chaussées* na França e leva em seu nome as iniciais do laboratório que o desenvolveu (LCPC) e é padronizado pela norma francesa NFP18-579 [7].

O teste de abrasividade LCPC utiliza material dentro da faixa granulométrica de 6,3 mm a 4,0 mm, menor que o ensaio de Bond, e necessita de 500 g de material e é realizado em etapa única: o material é inserido dentro de um recipiente com a placa de desgaste fixa a um rotor, que é mantido em 4.500 rpm por 5 minutos. Após este tempo a massa de material é retirada, peneirada para análise da geração de finos, que não será tratada neste estudo, e a placa pesada.

A placa utilizada no ensaio fica fixada no eixo vertical do rotor e é de aço C1015, com baixo carbono, e é pesada antes e depois do ensaio, assim como no ensaio de abrasividade de Bond, visto que o índice LAC de abrasividade do material é dada por (Equação 2):

$$LAC = 1000 \times (M_{\text{final}} - M_{\text{inicial}}) / M_{\text{amostra}} \quad (2)$$

Onde M_{inicial} e M_{final} são as massas da placa antes e após a realização do ensaio e M_{amostra} é a massa de material utilizada no ensaio ($500 \pm 0,2$ g). Quanto maior o índice LAC obtido, mais abrasivo é o material.

2 DESENVOLVIMENTO

2.1 MATERIAIS E MÉTODOS

Foi usado no estudo amostras de brita fornecidas pela empresa Embu S.A. Engenharia e Comércio, destaque no setor de fornecimento de agregados para construção, de cinco de suas unidades e com granulometrias diversas maiores que 1".

As amostras recebidas foram inicialmente britadas e peneiradas para se adequarem a faixa granulométrica entre $\frac{1}{2}$ " e $\frac{3}{4}$ ", padrão do ensaio de abrasividade de Bond. Foram feitas pilhas alongadas e estas, quarteadas para obter seis amostras de 1600 g, particionadas em quatro de 400 g cada, na granulometria do ensaio padrão. Cerca de 2 kg da massa recebida de cada unidade foi separada para análise química e mineralógica.

Após isso, a amostra restante na granulometria do ensaio de abrasividade de Bond foi britada para se adequar a faixa granulométrica entre 6,3 mm e 4 mm, padrão do ensaio de abrasividade LCPC e novamente seis amostras, dessa vez de ($500 \pm 0,2$ g), foram separadas. Novamente, cerca de 2 kg da massa recebida de cada unidade foi separada para análise química e mineralógica.

Outra alíquota de material entre $\frac{3}{4}$ e $\frac{1}{2}$ " foi cominuída em um britador de rolos e do mesmo modo, foi feita a separação de seis amostras de (500 ± 0,2 g), uma de cada unidade, para o desenvolvimento do ensaio alternativo ao LCPC com menores granulometrias.

Inicialmente foram feitos ensaios nas granulometrias padrões para os ensaios de Bond e LCPC para validação da correlação entre eles e na sequência foram realizados os ensaios nas granulometrias mais finas para o desenvolvimento do ensaio alternativo ao LCPC, mantidas todas as outras características do ensaio exceto a granulometria. Os ensaios LCPC e de Bond foram feitos no Laboratório de Tratamento de Minérios do Departamento de Engenharia de Minas e de Petróleo da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo (LTM-PMI-EPUSP).

As placas de aço utilizadas nos ensaios também foram separadas para ensaios de análise de dureza de forma a confirmar que elas se enquadram nas normas que ditam as condições padrão dos ensaios, para o ensaio LCPC e para o ensaio de Bond [7;13]. Estes ensaios foram realizados em um durômetro Rockwell no Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo.

A caracterização das amostras foi feita por Fluorescência de Raios X (FRX), para a análise química, e Difração de Raios X (DRX, para análise mineralógica. Ambas foram realizadas no Laboratório de Caracterização Tecnológica do Departamento de Engenharia de Minas e de Petróleo da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo (LCT-PMI-EPUSP).

2.2 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os resultados da análise química por FRX das amostras utilizadas para os ensaios de abrasividade padrão de Bond e LCPC, estão ilustrados na tabela 1 e os resultados da análise mineralógica por DRX estão reportados na tabela 2.

Tabela 1. Resultados da análise química por FRX

Amostra	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	MnO	MgO	CaO	Na ₂ O	K ₂ O	TiO ₂	P ₂ O ₅	PF
PP - "1/2 a 3/4"	71,7	14,1	3,03	0,15	0,57	1,78	2,96	4,78	0,29	0,12	0,44
PP - 4 mm a 6,3 mm	71,8	14,1	2,91	0,11	0,61	1,96	3,13	4,56	0,32	0,13	0,6
PE - "1/2 a 3/4"	66,7	14	5,35	0,18	1,26	2,56	3,12	5,14	0,67	0,27	0,65
PE - 4 mm a 6,3 mm	65,9	14,4	5,07	0,13	1,55	2,87	3,17	5,13	0,71	0,27	0,46
PI - "1/2 a 3/4"	65,7	15,2	5,27	0,13	0,94	2,28	3,21	5,19	0,69	0,24	0,68
PI - 4 mm a 6,3 mm	66,6	15,4	4,5	<0,10	0,89	2,23	3,22	5,39	0,61	0,22	0,4
PJ - "1/2 a 3/4"	69,5	14,5	3,8	0,17	0,85	2,16	3,78	4,06	0,54	0,19	0,22
PJ - 4 mm a 6,3 mm	69,2	14,9	3,27	0,1	0,81	2,13	3,88	4,24	0,52	0,18	0,37
PV - "1/2 a 3/4"	75	12,3	2,68	0,22	<0,10	0,54	4,08	4,17	<0,10	<0,10	0,4
PV - 4 mm a 6,3 mm	76,3	12,5	1,78	0,15	<0,10	0,54	4,22	4,23	<0,10	<0,10	0,29

Tabela 2. Resultados da análise mineralógica por DRX

Amostra	Mineralogia
PP	Quartzo, microclínio, albita, diopsídio, muscovita, caulinita.
PE	Quartzo, microclínio, albita, muscovita, pargasita.
PI	Quartzo, albita, muscovita, caulinita, ortoclase.
PJ	Quartzo, microclínio, albita, titanita, flogopita.
PV	Quartzo, microclínio, albita, caulinita, flogopita.

Tais resultados indicam que a mesma mineralogia e química foram mantidas para as amostras utilizadas nos testes padrão de abrasividade de Bond, padrão de abrasividade LCPC e para as amostras utilizadas para os ensaios de desenvolvimento do LCPC alternativo, utilizando granulometrias nas faixas de 6# Tyler a 8# Tyler (3,35 mm a 2,36 mm) e de 12# a 20# (1,70 mm a 0,85 mm), visto

que a massa utilizada para a obtenção das amostras para o ensaio alternativo foram obtidas diminuindo a massa restante da massa fracionada para os ensaios nas condições padrão.

Os ensaios de Bond e LCPC nas granulometrias padrões confirmaram as correlações obtidas pela Metso [8] e por Peres [1], como mostrado no gráfico de correlação da figura 3.

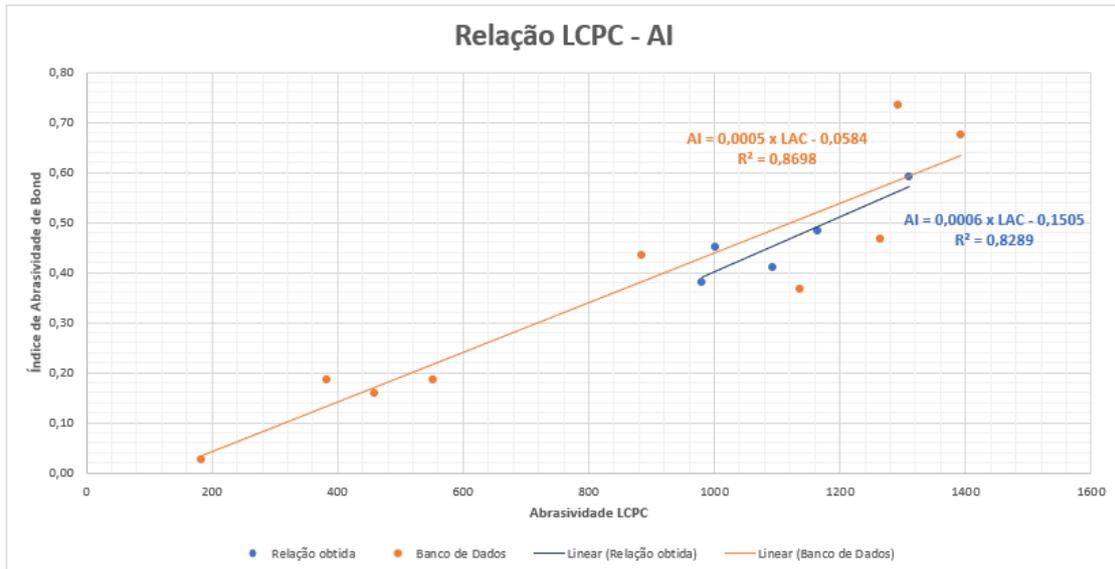


Figura 3. Correlação LCPC e AI de Bond da etapa de validação, comparando com Peres [1].

Para cada um dos ensaios de abrasividade das cinco unidades, foi obtido um LCPC adaptado, que foi relacionado graficamente com os valores de AI obtidos para o ensaio desses mesmos minérios para abrasividade de Bond nas condições padrão. Para essa associação LCPC adaptado – AI Padrão, foi construído um gráfico de dispersão de pontos e traçado uma linha de tendência linear para avaliar uma relação entre os dois índices (Figura 4).

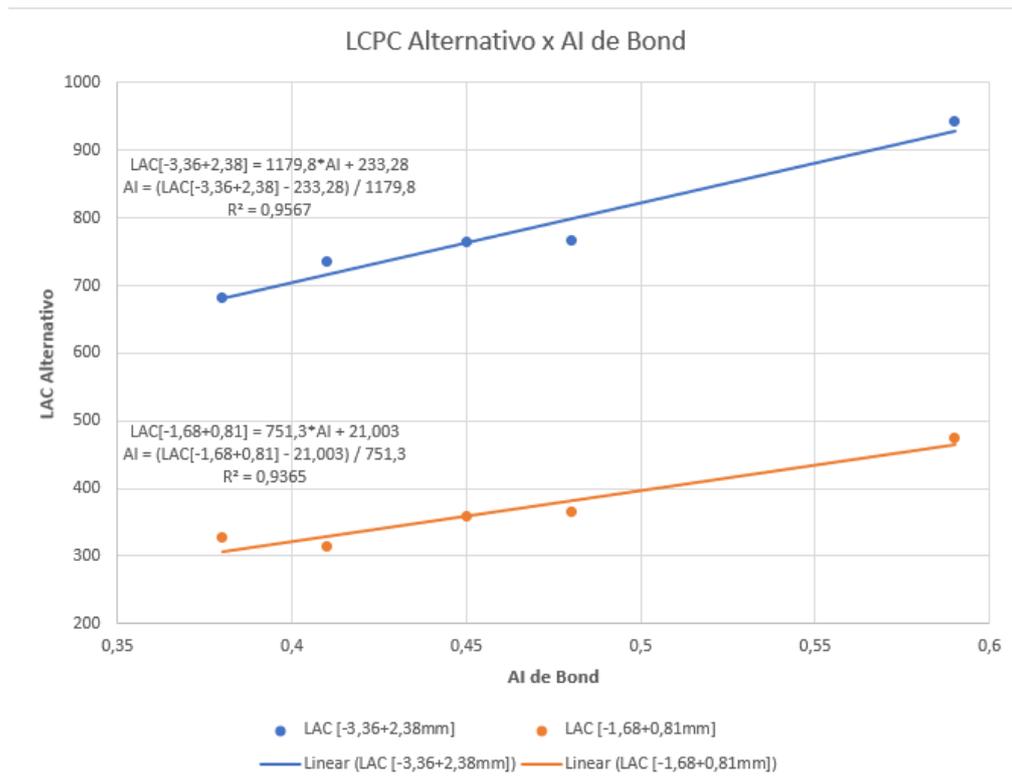


Figura 4. Correlação AI de Bond e LAC Alternativo

A partir da análise dos dados da Figura 4, pode se confirmar que há uma relação clara entre os índices do novo ensaio utilizando as granulometrias menores, desenvolvido neste projeto, e o índice AI de Bond do ensaio mais conhecido da indústria mineral.

3 CONCLUSÃO

Pelos resultados obtidos no atual projeto, conclui-se que há uma clara correlação entre os índices obtidos nos ensaios de abrasividade de Bond e no LCPC. Por essa correlação observada e já comprovada em outros estudos, foi possível desenvolver um ensaio modificado LCPC com granulometrias mais finas que as utilizadas no ensaio padrão, de 6,3 mm a 4,0 mm, chegando a granulometrias de duas faixas menores, entre 3,36 mm e 2,38 mm e entre 1,68 mm e 0,81 mm. A partir da correlação obtida, é possível afirmar que a utilização desse ensaio é possível para essas granulometrias e previsão de características abrasivas para minerais e rochas nessas faixas. Esses resultados podem ser utilizados em estudos nos quais granulometrias mais grosseiras ou as massas necessárias para o AI de Bond não estejam disponíveis, assim como para reduzir o tempo de realização dos ensaios em estudos com grandes quantidades de amostras.

Agradecimentos

A à Prof.^a Dr.^a Carina Ulsen, pelo auxílio teórico na etapa de caracterização. À empresa Embu S.A. Engenharia e Comércio pelo fornecimento das amostras de estudo e financiamento da etapa de caracterização das amostras. Aos técnicos do LTM/EPUSP, LCT/EPUSP e LPM/CTMM/IPT, pelo auxílio na preparação das

amostras e realização dos ensaios, em especial a Dora e ao Gaspar, técnicos que acompanharam mais de perto. Ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) pela bolsa concedida durante a realização deste projeto de iniciação científica, por meio do programa PIBIC/USP, edital 2018-2019.

REFERÊNCIAS

- 1 PERES, LM, BERGERMAN, MG, MASSOLA, CP. **AVALIAÇÃO DA ABRASIVIDADE DE MINÉRIOS A PARTIR DO ENSAIO LCPC COMO ALTERNATIVA AO MÉTODO DE BOND**. São Paulo: Escola Politécnica, Universidade de São Paulo; 2017.
- 2 DRUCKER, P. **VALIDITY OF THE LCPC ABRASIVITY COEFFICIENT THROUGH THE EXAMPLE OF A RECENT DANUBE GRAVEL**. Geomechanics and Tunnelling 4, 2011.
- 3 PIAZZETTA, GR, FIGUEIRA, IFR, MUNCH, D, RIBEIRO, BE, FIGUEIRA, EG, LAGOEIRO, LE, GONÇALVES, MA. **ENSAIOS DE ABRASIVIDADE EM ROCHA COMO SUPORTE PARA PREVISÃO DO CONSUMO DAS FERRAMENTAS DE PERFURAÇÃO – REVISÃO DO MÉTODO CERCHAR E CONSIDERAÇÕES INICIAIS**. 4º Congresso Brasileiro de Túneis, 2017.
- 4 MAJEED, Y, BAKAR, MZA. **EFFECTS OF VARIATION IN THE PARTICLE SIZE OF THE ROCK ABRASION POWDER AND STANDARD ROTATIONAL SPEED ON THE NTNU/SINTEF ABRASION VALUE STEEL TEST**. Bulletin of Engineering Geology and the Environment, 2017.
- 5 VIJOEN, SD. **REDUCED MAINTENANCE COSTS RESULTING FROM THE USE OF WEAR RESISTANT MATERIALS**. The Journal of The Southern African Institute of Mining and Metallurgy, 2010.
- 6 MASSOLA, CP, CHAVES, AP. **ABRASÃO-CORROSÃO EM CORPOS MOEDORES NA MOAGEM DE MINÉRIO DE FERRO**. São Paulo: Escola Politécnica, Universidade de São Paulo; 2015.
- 7 AFNOR Norma NF P18-579: **Aggregate – Abrasiveness and grindability tests**. França: AFNOR; Fevereiro, 2013.
- 8 METSO MINERALS. **Crushing and Screening Handbook**. Third edition, 2008.
- 9 KÄSLING, H, THURO, K. **DETERMINING ROCK ABRASIVITY IN THE LABORATORY**. European Rock Mechanics Symposium EUROCK, 2010. Lausanne, Switzerland.
- 10 THURO, K, SINGER, J, KÄSLING, H, BAUER, M. **DETERMINING ABRASIVITY WITH THE LCPC TEST**. 2007.
- 11 HAMZABAN, MT, JAKOBSEN, PD, SHAKERI, H, NAJAFI, R. **WATER CONTENT, EFFECTIVE STRESS, AND ROTATION SPEED IMPACT ON THE ABRASIVITY OF GRANULAR SOILS IN LCPC TEST RESULTS**. Elsevier, 2019.
- 12 PERES, LM, MASSOLA, CP, BERGERMAN, MG. **ABRASIVENESS EVALUATION OF PRE-CONCENTRATION OF COOPER SULFIDE ORE PRODUCTS THROUGH LCPC TEST**. Especial ABM Week 2017.
- 13 BOND, F. C. **METAL WEAR IN CRUSHING AND GRINDING**, Allis-Chalmers - Publication 07P1701, 1963.