



AVALIAÇÃO DE CIRCUITO INDUSTRIAL DE PRODUÇÃO DE AGREGADOS PARA CONSTRUÇÃO CIVIL

CUNHA, M.B.¹, BIRRO, E.H.F.¹, SANTOS, L.H.¹, MAGALHÃES, D.G.⁴

¹Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais (CEFET-MG), Departamento de Minas e Construção Civil, Laboratório de Tratamento de Minérios. e-mail: cunhabrmayara@gmail.com; fischer130490@gmail.com; leandro.ufmg.minas@gmail.com; douglasgmagalhaes@gmail.com.

RESUMO

A indústria de agregados para construção civil apresenta grande relevância para o cenário econômico de um país, englobando os insumos minerais mais consumidos no mundo. Considerando uma empresa de porte pequeno do setor, o presente estudo analisou seu circuito industrial, avaliando o desempenho do sistema de peneiramento e buscando propor alterações que tornassem a empresa mais competitiva. Assim, foi avaliado o dimensionamento do sistema de peneiramento e determinados seus parâmetros de eficiência e excelência. Além disso, foram propostas modificações nas aberturas na posição fechada (APF) dos britadores de mandíbula em busca de promover cenários de flexibilização e ampliação da cartela de produtos ofertados pela empresa. A flexibilização se mostrou mais promissor, pois envolve a aquisição de apenas um sistema de peneiramento de três *deck's*, investimento bem inferior ao do cenário de ampliação, onde seriam adquiridos britador e 2 sistemas de peneiramento. Com relação ao desempenho da peneira industrial, foi verificado que o 1° *deck* apresentou os melhores resultados para eficiência (92,4%) e excelência (92,7%). Quanto ao dimensionamento, o equipamento empregado apresentou área (8,6m²) superior à calculada (2,9m²), garantindo o bom desempenho do equipamento.

PALAVRAS-CHAVE: agregados; peneiramento; britagem.

ABSTRACT

The aggregate industry for civil construction has great relevance to the economic scenario of a country, encompassing the most consumed mineral inputs in the world. Considering a small company of the sector, the present study analyzed its industrial circuit, evaluating the performance of the sieving system and seeking to propose changes that would make the company more competitive. Thus, it was evaluated the sieving system sizing and determined its parameters of efficiency and excellence. In addition, modifications were made to the openings in the closed position (CCS) of the crushers in order to promote scenarios of flexibilization and expansion of the range of products offered by the company. Flexibilization proved to be more promising, since it involved the acquisition of only a three-deck sieving system, an investment well below the magnification scenario, where crusher and two sieving systems would be purchased. Regarding the performance of the industrial sieve, it was verified that the 1st deck presented the best results for efficiency (92.4%) and excellence (92.7%). As for the sizing, the equipment used presented an area (8.6m²) higher than the calculated one (2.9m²), guaranteeing the good performance of the equipment.

KEYWORDS: aggregates; screening; crushing.

1. INTRODUÇÃO

No setor mineral, entende-se por “agregados para construção civil” a matéria-prima mineral de uso imediato na indústria da construção civil, podendo ser bruta ou submetida a algum tipo de beneficiamento. Esse material é representado basicamente por areia e pedra britada (SILVA, 2012).

Apesar do maior destaque conferido a outros produtos do setor mineral, os agregados para construção civil são os materiais manufaturados mais consumidos no mundo. Estes possuem baixa elasticidade no preço e demanda, sendo essa subordinada a ciclos econômicos regionais (ANEPAC, 2014).

Os agregados possuem baixo valor unitário, sendo abundantes na natureza. Porém, seu consumo constitui um importante indicador do perfil socioeconômico de um país, isto porque o setor está diretamente ligado à qualidade de vida da população através de obras de infraestrutura, saneamento básico, moradia, dentre outros (VALVERDE, 2011).

As operações de beneficiamento pelas quais são submetidos esses agregados, são puramente mecânicas e compreendem uma ou mais etapas de britagem, além da separação granulométrica dos fragmentos de rocha. Esta última etapa tem expressiva importância, uma vez que a brita precisa atender às especificações granulométricas de mercado, previstas em norma (NBR 7225, 1993; NBR 7809, 2005; NBR 9935, 2011).

O objetivo geral deste estudo consistiu em avaliar o dimensionamento e desempenho (eficiência e excelência) do sistema de peneiramento que contempla o circuito industrial de produção de agregado para produção civil de uma empresa de pequeno porte do setor. Adicionalmente, foi realizada análise do *layout* do circuito industrial, sendo apresentadas possíveis alternativas aplicadas à planta da empresa, em busca de flexibilizar e diversificar a cartela de produtos oferecidos pela empresa. Tal proposição foi realizada a partir da interpretação das curvas fragmentatrizes dos britadores do circuito industrial.

2. MATERIAL E MÉTODOS

Os procedimentos experimentais deste trabalho incluem análise granulométrica das amostras, avaliação da eficiência e excelência de peneiramento, além do dimensionamento do sistema de peneiramento, e por fim, análise do circuito industrial.

2.1. Análise Granulométrica

O sistema de peneiramento industrial é composto por 3 decks de aberturas 22mm, 11mm e 5mm. Foram empregadas cinco amostras: pó de brita (-5mm), brita 0 (-11mm +5mm), brita 1 (-22mm +11mm), rachão (alimentação) e o material retido no 1ºdeck (+22mm). Todas elas foram coletadas no primeiro cenário de sistema de peneiramento. Estes materiais foram disponibilizados pela empresa, sendo oriundos de uma rocha composta por ‘granito gnáissico’.

Previamente à análise granulométrica a seco, o material foi segregado em 50,8 mm. A Tabela 1 apresenta a série de peneiras empregada na análise granulométrica de cada produto, sendo utilizada massa de alimentação em torno de 1kg (limitação técnica) e tempo de peneiramento de 20 minutos.

Tabela 1. Série de peneiras empregada na análise granulométrica de cada amostra.

#	2"	1 ½"	1 ¼"	1"	¾"	3/8"	4	6	8	10	20	28	35	48	70	100	150
Abertura (mm)	50,8	38,1	31,7	25,4	19	9,52	4,76	3,36	2,38	1,7	0,84	0,59	0,42	0,297	0,21	0,148	0,105
	RACHÃO																
	RETIDO 1º DECK																
		BRITA 1															
			BRITA 0														
				PÓ DE BRITA													

Visando obter a alimentação (A) referente a cada *deck*, foram agrupados o *undersize* (US) e o *oversize* (OS) provenientes de cada um destes. Este cálculo foi possível através da empresa que forneceu a taxa mássica (t/h) correspondente a cada produto. A definição destes materiais varia de acordo com a mudança de *deck*. Ou seja, a alimentação referente ao 2º *deck*, passa a ser o US proveniente do 1º *deck*, e assim por diante. Obtidas as alimentações referentes ao 2º e 3º *decks*, foram simuladas as análises granulométricas das mesmas, sendo somados os valores de massa para cada faixa dos produtos US e OS (reconciliação mássica das correntes de alimentação e produtos da peneira), montando assim uma nova tabela granulométrica.

A partir dos dados coletados, foram construídas as curvas granulométricas, ajustadas pelo modelo matemático adequado para distribuição granulométrica de partículas (foram avaliados os modelos propostos por *Gates-Gaudin-Schumann* (GGs) e *Rosin-Rammler* (RR). Para as análises granulométricas realizadas, foi obtida a perda mássica correspondente, além da análise da massa empregada no ensaio, de acordo com a teoria proposta por *Gaudin*.

2.2. Cálculo de Eficiência e Excelência

Determinou-se a eficiência para o passante (Equação 1) e retido (Equação 2). Os fatores %RA(US), %PA(US), %RA(OS) e %PA(OS) representam, respectivamente, o retido e o passante acumulados para o US e OS (CHAVES, 2012). Os cálculos de excelência (Equação 3) foram determinados pelo método proposto pela *Metso* em seu Manual de Britagem. Inicialmente, foram determinados os tamanhos referentes a d_{99} de US (D) e de d_1 de OS (d) para cada *deck* (METSO, 2005). O parâmetro AD corresponde a (D - d).

$$E(US) = \frac{\%PA(US) \times \text{Vazão de US} \left(\frac{t}{h}\right)}{\%PA(US) \times \text{Vazão de US} \left(\frac{t}{h}\right) + \%PA(OS) \times \text{Vazão de OS} \left(\frac{t}{h}\right)} \quad (1)$$

$$E(OS) = \frac{\%RA(OS) \times \text{Vazão de OS} \left(\frac{t}{h}\right) + \%RA(US) \times \text{Vazão de US} \left(\frac{t}{h}\right)}{\%RA(OS) \times \text{Vazão de OS} \left(\frac{t}{h}\right)} \quad (2)$$

$$E = 100 \cdot \left[1 - \frac{AD}{(D+d)}\right] \quad (3)$$

2.3. Avaliação do dimensionamento da peneira industrial do circuito

Visando avaliar o dimensionamento da peneira industrial presente no circuito, foram determinados a área e o comprimento de cada *deck* a partir da metodologia proposta pela *Metso* (Equação 4). São necessários os dados A (área/m²), T(alimentação/m³.h⁻¹), além dos fatores tabelados P, M k e Qn (METSO, 2005).

$$A = \frac{TxP}{CxMxQn} \quad (4)$$

2.4. Análise das etapas de peneiramento industrial e britagem

O sistema industrial é composto por duas peneiras vibratórias (CBS 6'X16'TD) dotadas de 3 *decks* (8,6m²), além de britadores primário de mandíbulas (Nordberg C106) e secundário cônico (HP200), todos da marca Mesto. Este sistema pode ser operado em dois cenários: o primeiro é caracterizado pelo emprego de *decks* com aberturas de 22mm, 11mm e 5mm, além de APF (secundário) de 19mm, destinado a produção de brita 1, brita 0 e pó de brita. O segundo cenário contempla *decks* com aberturas de 50 mm, 25mm e 5 mm, além de APF (secundário) de 32mm, produzindo brita 3, bica corrida e pó de brita. Em ambos os cenários, o APF (primário) permanece constante em 90mm.

Após uma análise detalhada da planta atual da empresa, levantou-se possíveis modificações, tanto para cenários que contemplavam ou não a aquisição de novos equipamentos. Para embasar as modificações propostas, foram coletadas informações, a partir de relatos da equipe técnica da empresa, sobre o melhor cenário de produção, de acordo com a demanda exigida por um futuro cenário econômico, que retornasse o maior número de produtos comercializáveis de alta demanda. Em seguida, foi realizado estudo de cada britador já existente e avaliadas suas possibilidades a partir das características de fabricação, contidas em seus respectivos manuais.

Para cada britador foram propostas modificações em sua abertura na posição fechada (APF). Assim, através da interpretação da curva fragmentatriz fornecida pelo fabricante e das faixas granulométricas de cada produto, foi possível chegar a uma distribuição granulométrica prevista do produto britado a partir da variação do APF. Com isso, foi possível selecionar o melhor cenário de flexibilização e/ou ampliação.

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os resultados da análise do sistema de peneiramento e do circuito industrial serão abordados neste tópico.

3.1. Determinação do modelo empírico para análise granulométrica

Através da análise de R² para cada produto, o modelo GGS, representou melhor a distribuição granulométrica das partículas, em detrimento do RR. A Tabela 2 mostra o modelamento segundo GGS para as amostras avaliadas.

Tabela 2. Modelamento matemático das análises granulométricas.

Produto	R ²		Linearização
	GGs	RR	GGs
Brita 1	0,731	0,6123	y = 0,7577x - 1,816
Brita 0	0,7625	0,6277	y = 0,8895x - 2,1858
Pó de Brita	0,9847	0,9791	y = 0,5246x - 0,0062
Retido no 1° Deck	0,7711	0,7596	y = 0,7998x - 2,5669
Alimentação do 2° Deck	0,9948	0,953	y = 0,5918x - 0,5904
Alimentação do 3° Deck	0,9845	0,9472	y = -0,1154x + 2,1975

$$\text{Rachão (Alim. do 1° Deck)} \quad 0,9933 \quad 0,9922 \quad y = 0,6173x - 1,0389$$

3.2. Cálculo de Eficiência e Excelência de Peneiramento

Pelo modelamento GGS e %PA e %RA dos produtos, foram obtidas as eficiências para US e OS para o 1° deck (92,4% e 95,1%), 2° deck (80,2% e 57,3%) e 3° deck (87,9% e 85,2%).

Através da análise dos resultados percebe-se que, apesar das eficiências para cada deck serem relativamente altas, somente no 1° deck, ela se encontra na faixa recomendada (acima de 90%), segundo o Manual de Britagem da Metso (2005). Em geral, industrialmente, o desempenho da operação se dá em relação à eficiência para o US, pois deseja-se recuperar o máximo possível de material passante presente na alimentação.

Um fator que contribuiu para a redução de eficiência nos 2° e 3° decks é a deficiência na estratificação das partículas. A estratificação ocorre quando as partículas menores escoam através dos espaços criados pelas partículas maiores, encaminhando-se para parte inferior do leito de partículas sobre a tela, atingindo a superfície de peneiramento (CHAVES e PERES, 2012). Este fenômeno é favorecido pelo efeito de vibração do equipamento, sendo influenciado por fatores como: umidade, amplitude, frequência e inclinação.

Foram construídas as curvas granulométricas do OS e US de cada deck. A partir dos valores obtidos para D e d de cada deck foram calculadas as excelências para o 1° deck (92,7%), 2° deck (42,0%) e 3° deck (50,0%). Somente o 1° deck, encontra-se na faixa ideal de excelência, de acordo com o Manual de Britagem da Metso (entre 80% e 90%). Este deck foi o que apresentou menor distância entre os tamanhos d e D, significando que a operação foi mais precisa. Percebe-se que os valores de Eficiência e Excelência corroboram entre si.

3.3. Avaliação do dimensionamento da peneira industrial do circuito

Obtidos os fatores para área e largura ideais para cada deck, foi calculada as respectivas larguras (Tabela 3). A peneira empregado na empresa apresenta a área de peneiramento (8,6m²) maior que a área obtida pelo dimensionamento (3,29 m²). Logo, foi avaliado como correto o dimensionamento da peneira industrial do circuito. Assim, a peneira apresenta dimensões suficientes para promover a execução eficiente da operação. Ou seja, o equipamento é capaz de promover a estratificação do leito de partículas, além da passagem das partículas menores pelas aberturas e do transporte das partículas maiores de uma extremidade à outra do deck.

Tabela 3. Resultados de dimensionamento da peneira industrial.

	A (m ²)	W (m)	L (m)
1° Deck	3,29	0,89	3,72
2° Deck	2,58	0,64	4,05
3° Deck	2,73	0,83	3,28

3.4. Britagem

Após análise das características de fabricação de cada britador presente na planta industrial, foi constatado que estes possuem um ajuste de abertura na posição fechada (APF)

e aberta (APA). Neste caso, foram analisadas as variações em APF, já que o fabricante fornece a curva fragmentatriz em função deste parâmetro.

Inicialmente, o estudo foi voltado para o britador de mandíbulas *Nordberg C106*, que apresenta construção modular sem soldas. O modelo possui APF que varia entre 70 e 200mm e capacidade de 150 a 500t/h, de acordo com o APF (METSO, 2013).

No cenário inicial, a empresa não produzia brita com granulometria maior que 50mm. Assim, em um cenário de flexibilização, produtos como a brita 3, 4, 5 e o rachão deveriam também ser priorizados. Logo, foram selecionadas as faixas granulométricas a serem analisadas conforme a modificação na abertura do britador primário.

Cada britador possui uma faixa de variação de APF, onde cada valor de abertura fornece uma porcentagem de passante em uma faixa granulométrica, fornecendo assim uma granulometria indicativa de produto (Tabela 4).

Tabela 4. Estimativa de distribuição dos produtos obtidos para cada APF considerado (C106).

Produto	Especificação	%Produção				
		APF 70mm	APF 100mm	APF 130mm	APF 160mm	APF 200mm
Rachão	+100mm	6	21	46	56	65
Brita 5	-100mm +76mm	19	25	11	10	7
Brita 4	-76mm +50mm	25	16	15	10	8
Brita 3	-50mm +25mm	23	18	13	10	10
< Brita 3	-25mm	27	20	15	14	10

Para este estudo foram analisados APF de 70, 100, 130, 160 e 200mm. Após a análise dos cenários, a tomada de decisão ficou condicionada ao cenário mais flexível, ou seja, com a produção da maior gama de produtos em uma proporção parecida. Além disso, deve-se considerar que o material abaixo de brita 3 irá alimentar o britador secundário, assim a proporção deste produto não pode ser tão baixa. Levando em conta estes requisitos, o cenário que se apresentou mais aplicável para a flexibilização foi o de abertura em 100mm.

Estudo semelhante foi feito para o britador cônico HP200 (secundário), que possui APF de 10 a 38mm e capacidade de 90 a 250t/h variando conforme a abertura. A análise da distribuição indicativa foi feita através de tabela granulométrica do produto (METSO, 2002).

Para este britador foi feita a análise para as menores aberturas e dentro de uma faixa granulométrica específica, na qual se tinha Brita 1, Brita 0 e Pó. Foram analisadas APF de 10 e 13mm (Tabela 5). Os produtos esperados após a britagem secundária são produtos de menor granulometria. Neste caso a empresa apresentou uma demanda mais específica, uma vez que existe um contrato previsto para fornecimento de areia industrial, assim o melhor cenário seria o com maior produção de brita 0.

Tabela 5. Estimativa de distribuição dos produtos obtidos para cada APF considerado (HP200).

APF (mm)	Produto	Especificação	%Produção	
			APF = 10mm	APF = 13mm
100	Brita 1	-22mm + 11mm	11	27
	Brita 0	-11mm + 5mm	39	33

Pó -5mm 50 40

Quando se compara as porcentagens de produto com as duas APF utilizadas, nota-se que houve diferença de apenas 6 pontos percentuais de um cenário para o outro. Além disso, o cenário com APF maior apresentou uma distribuição mais homogênea. A partir dessa análise, foi selecionado APF de 13 mm para um cenário de flexibilização.

Após, foi necessário um estudo de uma nova planta. Inicialmente, o circuito conta apenas com uma peneira vibratória de três *decks*. Para retirada de novos produtos se faz necessário o investimento em uma nova peneira logo após a britagem primária, visando a separação granulométrica destes. Para a planta de flexibilização foi proposto o fluxograma simplificado apresentado na Figura 1, considerando a distribuição percentual dos produtos.

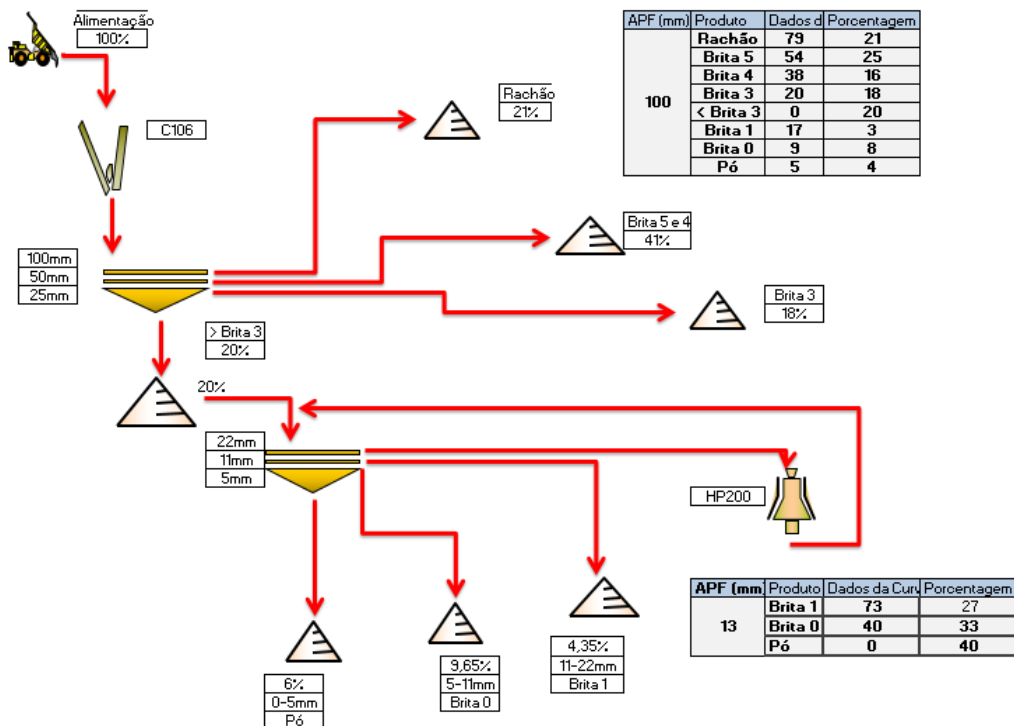


Figura 1. Fluxograma proposto para flexibilização.

Para um cenário com grande produção de material fino, principalmente brita 0, e pouca produção de material grosso, uma opção seria o encaminhamento do material retido no 2° e 3° *decks* da primeira peneira para a segunda. Assim, seria possível aumentar assim a porcentagem que alimenta o britador secundário. O cenário de flexibilização se apresenta promissor já que o investimento realizado é menor em relação aos demais.

4. CONCLUSÕES

Quanto ao desempenho do sistema de peneiramento, foram constatadas falhas que resultaram em valores reduzidos de Eficiência (80,2% e 87,9%) e Excelência (42,% e 50,0%) para os 2° e 3° *decks*, respectivamente. Já para o 1° *deck*, tais parâmetros foram melhores (9+2,4% e 92,7%, respectivamente). Como os produtos analisados apresentam granulometria bem grosseira, mesmo a área de cada *deck* apresentando área (8,6m²) maior

que a recomendada (3,29 m²), pode não ser suficiente para a passagem das partículas pela malha, fazendo com que muitas fiquem presas às aberturas, necessitando assim de um número elevado de tentativas ou ação mais vigorosa do sistema vibratório.

Através da análise da planta atual foi possível perceber que a quantidade e gama de produtos produzidos atualmente não atende a real demanda. Assim os cenários de flexibilização e ampliação da planta se apresentam como os cenários mais favoráveis. Para o cenário de ampliação o investimento é bem superior quando comparado ao de flexibilização, isto ocorre porque este cenário prevê a compra de um novo britador e duas peneiras vibratórias, de um e dois deques, o que aumenta exorbitantemente seu valor de investimento. Além da obtenção de novos equipamentos um novo *layout* de planta deve ser estudado neste caso, já que acrescentando novos equipamentos uma maior área será requerida pela planta e para armazenagem de produtos, além de gastos com fiação e requerimento de energia elétrica. Uma grande vantagem deste cenário é alta produção, já que o britador HP300 apresenta capacidade em t/h superior ao HP200, além de uma melhor qualidade nos produtos.

5. AGRADECIMENTOS

Agradecimentos ao Centro Fderal de Educação Tecnológica de Minas Gerais (CEFET-MG) pelo fomento para a realização e publicação da pesquisa.

6. REFERÊNCIAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 7225: Materiais de pedra e agregados naturais. Rio de Janeiro, 1993. 4p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 7809: Agregado Graúdo – Determinação do índice de forma pelo método do paquímetro. Rio de Janeiro, 2005. 3p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 9935: Agregados – terminologia. Rio de Janeiro, 2011. 12p.

ASSOCIAÇÃO NACIONAL DE ENTIDADES DE PRODUTORES DE AGREGADOS PARA CONSTRUÇÃO CIVIL. Agregados. 2014.

CHAVES, A.P. Teoria e prática do tratamento de minérios: britagem, peneiramento e moagem. 5. ed. São Paulo: Oficina de Textos, 2012. v.3.

METSO. Britador Cônico Nordberg série HP. 2002. 11p

METSO. Manual de Britagem. 2005. 432p

METSO. Nordberg, Britadores de mandíbulas série C. 2013. 23p.

SILVA, G.A. Diagnóstico do setor de agregados para a construção civil na região metropolitana de Natal-RN. Recife, 2012. 193 p.

VALVERDE, F.M. Agregados para construção civil. Balanço mineral Brasileiro 2001.