

UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA
FACULDADE DE ENGENHARIA QUÍMICA

LORENA DE LIMA FERNANDES

ANÁLISE VISANDO À SUBSTITUIÇÃO DE UM MOINHO AUTÓGENO POR UM
MOINHO TRADICIONAL SEGUNDO O MÉTODO DE BOND

Uberlândia

2023

LORENA DE LIMA FERNANDES

ANÁLISE VISANDO À SUBSTITUIÇÃO DE UM MOINHO AUTÓGENO POR UM
MOINHO TRADICIONAL SEGUNDO O MÉTODO DE BOND

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à Faculdade de Engenharia Química da Universidade Federal de Uberlândia como requisito parcial para obtenção do título de bacharela em Engenharia Química.

Orientador: Prof. Dr. Moilton Ribeiro Franco Júnior

Uberlândia

2023

Ficha Catalográfica Online do Sistema de Bibliotecas da UFU
com dados informados pelo(a) próprio(a) autor(a).

F363
2023 Fernandes, Lorena de Lima, 1994-
ANÁLISE VISANDO À SUBSTITUIÇÃO DE UM MOINHO AUTÓGENO
POR UM MOINHO TRADICIONAL SEGUNDO O MÉTODO DE BOND
[recurso eletrônico] / Lorena de Lima Fernandes. - 2023.

Orientador: Moilton Ribeiro Franco Júnior .
Trabalho de Conclusão de Curso (graduação) -
Universidade Federal de Uberlândia, Graduação em
Engenharia Química.

Modo de acesso: Internet.

Inclui bibliografia.

Inclui ilustrações.

1. Engenharia química. I. , Moilton Ribeiro Franco
Júnior, 1962-, (Orient.). II. Universidade Federal de
Uberlândia. Graduação em Engenharia Química. III.
Título.

CDU: 66.0

Bibliotecários responsáveis pela estrutura de acordo com o AACR2:
Gizele Cristine Nunes do Couto - CRB6/2091
Nelson Marcos Ferreira - CRB6/3074

LORENA DE LIMA FERNANDES

ANÁLISE VISANDO À SUBSTITUIÇÃO DE UM MOINHO AUTÓGENO POR UM
MOINHO TRADICIONAL SEGUNDO O MÉTODO DE BOND

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à Faculdade de Engenharia Química da Universidade Federal de Uberlândia como requisito parcial para obtenção do título de bacharela em Engenharia Química.

Orientador: Prof. Dr. Moilton Ribeiro Franco Júnior

Uberlândia, 16 de junho de 2023.

Banca Examinadora:

Prof. Dr. Moilton Ribeiro Franco Junior (UFU)

Prof. Dr. Rubens Gedraite (UFU)

Profa. Dra. Thamayne Valadares de Oliveira (UFU)

“Mesmo quando tudo parece desabar, cabe a mim decidir entre rir ou chorar, ir ou ficar, desistir ou lutar; porque descobri, no caminho incerto da vida, que o mais importante é o decidir.”

Cora Coralina

RESUMO

A moagem visa a redução do tamanho das partículas a fim de liberar o material de interesse com a concentração desejada para as etapas seguintes. A moagem industrial é principalmente realizada por equipamentos chamados moinhos, sendo o moinhos de bolas, de barras e autógeno os três dos principais tipos conhecidos. Uma das principais grandezas usadas no dimensionamento de moinhos é a potência gasta no processo. No presente trabalho, estuda-se a possibilidade de substituição de um moinho autógeno, em uma planta de processamento de minério de ferro, por um moinho tradicional, quer seja de bolas ou barras. Será verificado o tipo de moinho que apresenta um melhor desempenho energético, mantendo-se a mesma redução de partícula e utilizando o método de Bond nas estimativas necessárias.

Palavras-chave: Bond; autógeno; moinho de barras; moinho de bolas; substituição.

ABSTRACT

Milling aims to reduce the size of particles in order to release the material of interest with the desired concentration for the following steps. Industrial grinding is mainly carried out by equipment called mills, with the ball mill, bar mill and autogenous mill being the three of the main known types. One of the main quantities used in mill sizing is the power spent in the process. In the present work, we studied the possibility of replacing an autogenous mill, in an iron ore processing plant, by a traditional mill, either balls or bars. The type that presents the best energy performance will be verified, keeping the same particle reduction and using the Bond method in the calculations.

Keywords: Bond; autogenous; bar mill; ball mill; replacement.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 –	Circuito de moagem para processamento de minério de ferro.....	16
Quadro 1 –	Valores de WI para diferentes composições de ferro.....	18
Figura 2 –	Potência real em função das potências estimadas sem fator de correção...	31
Figura 3 –	Potência real em função das potências estimadas com fator de correção...	32
Figura 4 –	Potência real em função das potências estimadas com fator de correção e $D=4,37$ m.....	33
Figura 5 –	Estimativas de potência para moinho de barras.....	33
Figura 6 –	Estimativas de potência para moinho de bolas.....	34
Figura 7 –	Potência requerida pela capacidade de processamento para moinhos de barras.....	35
Figura 8 –	Potência requerida pela capacidade de processamento para moinhos de bolas.....	36
Figura 9 –	F_6 em função do F_{80} para moinhos de barras com diâmetros diferentes.....	37
Figura 10 –	Potência requerida na moagem em função da vazão de minério para três tipos de moinhos.....	38

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Potências estimadas pelo modelo Minnovex modificado para os dados experimentais.....	17
Tabela 2 – Estimativa para moinho de barras.....	19
Tabela 3 – Estimativa para moinho de bolas.....	20
Tabela 4 – Erros para os moinhos de barras e bolas.....	21
Tabela 5 – Estimativa para moinho de barras com fatores de correção.....	23
Tabela 6 – Estimativa para moinho de bolas com fatores de correção.....	24
Tabela 7 – Erros para os moinhos de barras e bolas com fatores de correção.....	25
Tabela 8 – Estimativa para moinho de barras para $D=4,37$ m.....	26
Tabela 9 – Estimativa para moinho de bolas para $D=4,37$ m.....	26
Tabela 10 – Erros para os moinhos de barras e bolas com $D=4,37$ m.....	27
Tabela 11 – Estimativa para moinho de barras para $D=1,10$ m.....	28
Tabela 12 – Estimativa para moinho de bolas para $D=1,10$ m.....	29

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	11
2	ESTIMATIVA DA POTÊNCIA PARA MOINHOS DE BARRAS E BOLAS	16
2.1	Sem aplicação dos fatores de correção	17
2.2	Com aplicação dos fatores de correção.....	21
2.3	Aplicação dos fatores de correção propondo $D=4,37$ m.....	25
2.4	Aplicação dos fatores de correção propondo $D=1,10$ m.....	28
3	DISCUSSÃO DOS RESULTADOS	31
3.1	Comparação do moinho autógeno com o de barras e bolas sem correção	31
3.2	Comparação do moinho autógeno com o de barras e bolas com correção	31
3.3	Comparação do moinho autógeno com o de barras e bolas com correção ($D=4,37$ m).....	32
3.4	Comparação das estimativas para o moinho de barras	33
3.5	Comparação das estimativas para o moinho de bolas.....	34
3.6	Avaliação do diâmetro em moinhos de barras.....	34
3.7	Avaliação do diâmetro em moinhos de bolas	35
3.8	Influência do diâmetro interno do moinho de barras no F6.....	36
3.9	Desempenho dos moinhos analisados	37
4	CONCLUSÃO	39
	REFERÊNCIAS.....	40

1 INTRODUÇÃO

A moagem é a etapa do processo responsável pela redução do tamanho das partículas, a fim de liberar o mineral de interesse com a concentração desejada para as etapas seguintes, permitindo atingir as granulometrias conforme as exigências de mercado bem como facilitar o manuseio do material (OLIVEIRA, 2012).

A moagem é o último estágio do processo de fragmentação (LUZ; SAMPAIO; FRANÇA, 2010). Segundo Oliveira (2012), as definições para fragmentação são variadas, mas todas se assemelham no que diz respeito a ser uma operação unitária, em que se consegue a redução de tamanho dos minérios. A fragmentação possui três mecanismos principais, sendo o impacto, a compressão e o cisalhamento. Os mecanismos podem ocorrer de modo conjunto ou individual.

De acordo com Valadão e Araújo (2007 apud OLIVEIRA, 2012), o mecanismo do impacto gera partículas com uma larga faixa de distribuição granulométrica, por meio do uso de uma força maior do que a resistência das partículas; o cisalhamento ocorre quando a aplicação de uma força sobre o material não é suficiente para acarretar a quebra em toda a partícula, formando partículas muito finas, devido a diminuição do corpo da partícula original.

Na compressão, a partícula sofre uma tensão entre duas superfícies, resultando na geração de dois produtos distintos, sendo as partículas grossas e partículas finas (WILLS; NAPIER-MUNN, 2006).

Luz, Sampaio e França (2010) concluíram que a moagem é a parte da fragmentação que necessita maiores investimentos, gera o maior gasto de energia e é uma etapa fundamental para o bom desempenho no tratamento de minérios e, por isso, essa etapa merece um estudo aprofundado no momento do dimensionamento e escolha de equipamento. A operação da moagem na indústria é de extrema importância, pois é a etapa que mais consome energia no processamento mineral. O movimento dos corpos moedores dentro do moinho é responsável por utilizar a maior parte da energia disponibilizada para a moagem.

Dependendo do processo e das características do material, a moagem pode ser classificada em dois tipos de processo, via seca ou via úmida (LUZ; SAMPAIO; FRANÇA, 2010; METSO, 2005; OLIVEIRA, 2012; FARIA et al., 2021).

A moagem via seca é comumente realizada quando os materiais sofrem reações indesejadas com a presença da água (LUZ; SAMPAIO; FRANÇA, 2010; OLIVEIRA, 2012). Também é usada quando o processo exige menos desgaste nos revestimentos e corpos

moedores, em contrapartida gera a produção de partículas mais finas (LUZ; SAMPAIO; FRANÇA, 2010; WILLS; NAPIER-MUNN, 2006).

No caso da moagem via úmida, o material é alimentado no moinho com uma determinada quantidade de água formando uma espécie de polpa. O emprego de tal via tem como principais vantagens a menor potência requerida em relação a via seca, facilidade de controle e a não necessidade de se fazer controles reguladores de pó. Como principal desvantagem, tem-se os desgastes sofridos pelos revestimentos e corpos moedores (METSU, 2005).

Quanto ao tipo de circuito do processo, a moagem pode ser realizada em dois tipos, aberto ou fechado, determinado pelas especificações desejadas do produto ou classificação do material (LUZ; SAMPAIO; FRANÇA, 2010; OLIVEIRA, 2012).

No circuito aberto, o material passa pelo moinho em uma única passagem, não havendo controle da distribuição das partículas (LUZ; SAMPAIO; FRANÇA, 2010; OLIVEIRA, 2012). Segundo Luz, Sampaio e França (2010), as taxas de alimentação em circuitos abertos devem ser baixas o suficiente para que todas as partículas sofram a fratura, com isso, ocorre um consumo de energia desnecessário e, por isso, é um tipo de circuito pouco utilizado na indústria.

O circuito fechado de moagem passa o produto do moinho por um equipamento de classificação e a parte grosseira retorna ao moinho, passando pelo mesmo quantas vezes forem necessárias para se alcançar a granulometria desejada. Como estas partículas, antes de retornarem e serem misturadas com uma alimentação nova, são classificadas, a sobremoagem diminui consideravelmente em relação ao circuito aberto, podendo se dizer que há uma economia energética na comparação entre os dois circuitos (LUZ; SAMPAIO; FRANÇA, 2010; OLIVEIRA, 2012).

Segundo Luz, Sampaio e França (2010), as tendências observadas até o momento, indicam que as operações de circuitos de fragmentação continuarão sendo consideradas como os itens de maior relevância em relação ao custo operacional em usinas de tratamento de minérios, devido ao consumo de energia, desgaste de revestimentos e desgaste dos corpos moedores. Avanços nos quesitos relacionados a eficiência na utilização de energia e minimização do desgaste de revestimentos e corpos moedores são fundamentais para o processo de moagem e assuntos de grande motivação atualmente para pesquisadores da área.

A moagem industrial é principalmente realizada pelos equipamentos chamados “moinhos”, os quais em sua grande maioria são cilindros rotativos com placas de desgaste como revestimento interno, onde se encontram os corpos moedores para realizar o processo de moagem. Os mencionados corpos são elevados devido ao movimento de rotação do moinho e

então caem sobre o revestimento, resultando junto do movimento de escorregamento desses corpos sobre o revestimento e do impacto entre os corpos, na quebra do material. Essa queda é conhecida como “cascata” ou “catarata” (METSO, 2005).

De acordo com Luz, Sampaio e França (2010) os corpos moedores devem ter o tamanho adequado conforme a granulometria desejada para que a capacidade de operação do equipamento e sua eficiência não sejam reduzidas.

Para Metso (2005), os moinhos tendem a serem classificados de acordo com a natureza dos seus corpos moedores, sendo o moinho de bolas e o moinho de barras os principais moinhos semiautógenos (SAG). Há também o moinho autógeno (AG) que utiliza o próprio minério a ser cominuído como corpo moedor. Esses três são os principais tipos de moinhos rotativos.

Moinho de bolas é o nome dado aos moinhos rotativos que usam esferas como corpos moedores, podendo ser utilizados em via úmida ou via seca e, principalmente, em circuito fechado de moagem. As bolas têm seus tamanhos definidos por meio do tamanho da alimentação e do “work index” (WI) do material, mas adota-se de modo grosseiro que o maior tamanho de esfera seja de 4 a 5 vezes o tamanho da alimentação (METSO, 2005).

Ainda, segundo Metso (2005), a alimentação dos moinhos de bolas varia, mas a ideal é a de 80% passante em malha de 14 a 20 mesh. É comum que a preparação da alimentação para moinhos de bolas seja realizada por moinhos de barras ou britadores.

As definições corretas do dimensionamento dos moinhos de bolas são fundamentais para que se alcance um produto com as especificações desejadas, assim como uma otimização do processo adequada, melhorando a eficiência e reduzindo os custos operacionais (OLIVEIRA, 2012).

Os moinhos de barras são moinhos cilíndricos, os quais fazem-se uso de barras como moedor, são capazes de receber uma alimentação consideravelmente grossa, em torno de 50 mm e produzir um material consideravelmente fino, em torno de 500 μm (LUZ; SAMPAIO; FRANÇA, 2010).

O moinho de barras tem como principal característica o comprimento da seção cilíndrica de 1,25 a 2,5 vezes o diâmetro, sendo uma razão muito importante, pois as barras com poucos centímetros menores que o comprimento do cilindro, devem ser impedidas de atravessarem internamente pelo mesmo (LUZ; SAMPAIO; FRANÇA, 2010). As barras do moinho devem possuir um comprimento de 6” menor em relação ao comprimento efetivo de moagem do moinho (METSO, 2005).

Moinhos autógenos têm como princípio moer o material empregando o próprio material como corpo moedor. Materiais mais granulares são os mais indicados para serem submetidos à

moagem autógena. Um dos principais problemas dos moinhos autógenos é que em determinadas situações o material pode ser muito fino para o mesmo moer e muito grosso para ser moído, sendo necessário, como alternativa, em tais circunstâncias, adicionar algumas bolas como corpos moedores, denominando assim o moinho como semiautógeno (METSO, 2005).

Os moinhos autógenos e semiautógenos são largamente utilizados em linhas industriais de fragmentação, em que a capacidade de processamento se dá por uma larga faixa em comparação com os demais circuitos (LUZ; SAMPAIO; FRANÇA, 2010).

No trabalho de Behnamfard, Roudi e Veglio (2020) é explorado o assunto, ao estudar o desempenho de um moinho autógeno para processamento de minério de ferro, de acordo com as características do material de alimentação, com a aplicação de um modelo muito utilizado para análise energética de moinhos autógenos, denominado modelo Minnovex.

O principal fator para o dimensionamento de moinhos tubulares é a determinação da potência absorvida pelo processo de moagem. Muitos métodos foram desenvolvidos com o passar dos anos, para tentar quantificar a energia requerida para moagem (OLIVEIRA, 2012).

Uma das dificuldades na quantificação da energia se deve ao fato de que grande parte da energia do processo é absorvida pelo moinho e uma pequena parte é aplicada na fragmentação das partículas, sendo que parte desta é absorvida no processo de mudança de forma (WILLS; NAPIER-MUNN, 2006).

Gupta e Yan (2016) apresentam em seu trabalho para o dimensionamento de moinhos de bolas e barras a metodologia que se baseia no método publicado em Bond (1961), o qual tem como principal fator, o índice de trabalho (WI).

O WI é a energia requerida para fragmentar uma tonelada de material até um produto em que 80% das partículas passem em 100 μm , este fator é relacionado à resistência do material, podendo ser determinado por meio de testes operacionais ou de laboratório (BOND, 1961). O método de Bond (1961) é aplicado no presente estudo, também é explorado em Luz, Sampaio e França (2010); Metso (2005) e Oliveira (2012).

Segundo Gomes et al. (2014), o método de Bond possui algumas limitações quanto à sua aplicação, devido a alguns motivos como:

- a) aplicado utilizando parâmetros e condições pré-estabelecidas por Bond;
- b) o gasto de energia é obtido através dos parâmetros P_{80} (tamanho da malha, medida em micrômetros – μm – em que 80% do produto é passante) e F_{80} (tamanho da malha, em μm , em que 80% da alimentação é passante) e, conseqüentemente, não considera a distribuição granulométrica completa do material;

- c) adotar classificação fixa dos circuitos, não permitindo analisar interações entre as unidades do circuito e efetuar as alterações nas configurações e tamanho dos equipamentos.

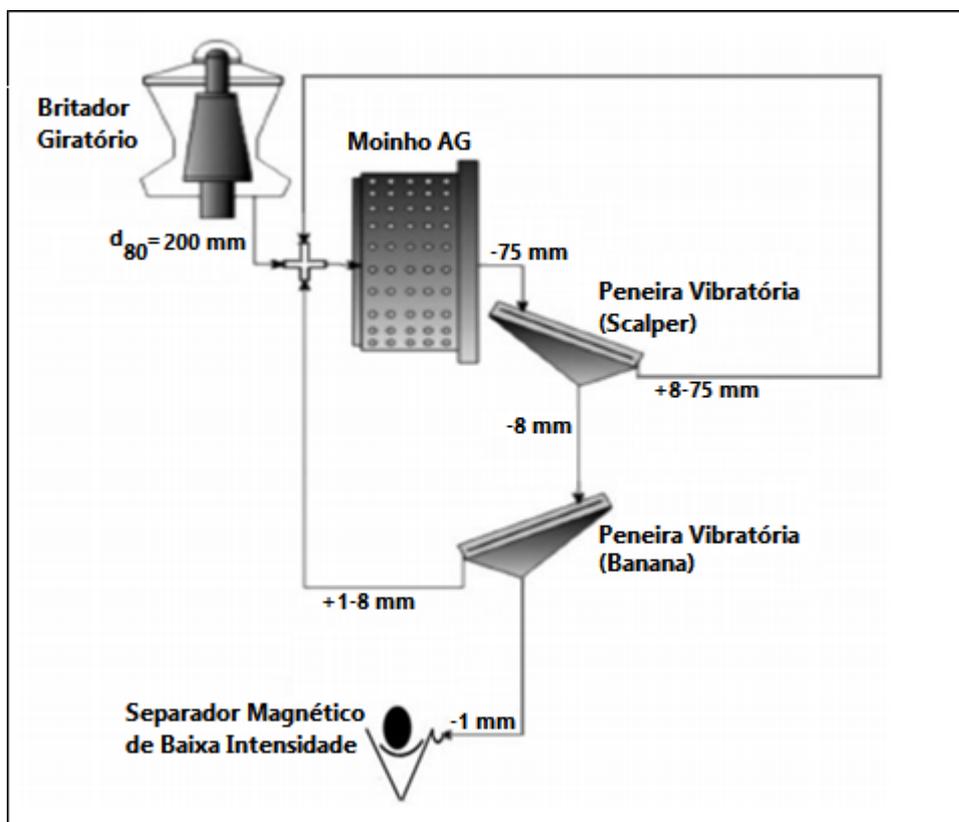
A energia calculada pela metodologia de Bond (1961) é para condições específicas. Para moinho de barras, as condições são: circuito aberto, via úmida e moinho com aproximadamente 2,44 m de diâmetro interno ao revestimento. Para moinho de bolas são: circuito fechado, via úmida e moinho de, aproximadamente, 2,44 m de diâmetro interno ao revestimento. Por essa razão, ao utilizar a equação de Bond para diferentes especificações, devem ser aplicados oito fatores de correção estabelecidos pelo método de Bond, os quais são:

- F1 – fator de correção para moagem via seca;
- F2 – fator de correção para circuito aberto em moinhos de bolas;
- F3 – fator de correção para o diâmetro interno do moinho;
- F4 – fator de correção para alimentação de tamanho excessivo;
- F5 – fator de correção para a finura do material em moinhos de bolas;
- F6 – fator de correção para taxa de redução em moinho de barras;
- F7 – fator de correção para taxa de redução em moinho de bolas;
- F8 – fator de correção para eficiência em moinho de barras.

2 ESTIMATIVA DA POTÊNCIA PARA MOINHOS DE BARRAS E BOLAS

No presente trabalho, estudou-se a possibilidade de substituição de um moinho autógeno em uma planta para processamento de minério de ferro, apresentada no estudo de Behnamfard, Roudi e Veglio (2020) e mostrada na Figura 1, por moinhos de barras e de bolas com suas respectivas potências estimadas através da metodologia de Bond (1961) apresentada em Gupta e Yan (2016).

Figura 1 – Circuito de moagem para processamento de minério de ferro.



Fonte: Behnamfard, Roudi e Veglio (2020).

Para o circuito mostrado, Behnamfard, Roudi e Veglio (2020) coletaram 21 (vinte e um) pontos experimentais realizando a estimativa da potência consumida (P) e da energia gasta (E) em função da taxa de alimentação fresca (Q), os quais também serão considerados para estimativas no presente trabalho. Os dados são apresentados na Tabela 1.

Tabela 1 – Potências estimadas pelo modelo Minnovex modificado para os dados experimentais.

Exp. No.	P _{real} (kW)	Q (t/h)	E _{real} (kWh/t)	P (kW)
01	3211,51	370,31	8,67	3147,64
02	3562,11	375,49	9,49	3578,42
03	5403,13	637,29	8,48	5321,37
04	4927,75	601,24	8,20	5116,55
05	2852,41	400,31	7,13	2938,28
06	3257,00	439,62	7,41	3275,17
07	4263,13	459,62	9,28	4141,18
08	3686,16	421,19	8,75	3689,62
09	4009,77	495,07	8,10	3911,05
10	4671,33	524,44	8,91	4431,52
11	4290,57	561,08	7,65	4438,14
12	3558,38	486,06	7,32	3606,57
13	2946,86	415,19	7,10	2947,85
14	3434,34	472,56	7,27	3577,28
15	3563,07	492,96	7,23	3820,44
16	4053,49	534,74	7,50	4026,59
17	5987,72	683,18	8,76	5718,22
18	3457,62	521,47	6,63	3326,98
19	3889,08	565,35	6,88	3691,74
20	3902,09	553,70	7,05	3748,55
21	4817,98	511,39	9,42	4755,93

Fonte: Adaptado de Behnamfard, Roudi e Veglio (2020).

2.1 Sem aplicação dos fatores de correção

O primeiro passo para realização da estimativa pela metodologia de Bond é obter o “Work Index” (WI) do material para cada ponto experimental. Para essa atribuição de valores para cada composição encontrada nos pontos experimentais, procura-se na literatura, especificamente no manual de britagem publicado por Metso (2005), alguns valores comuns de WI para diferentes composições do minério de ferro, mostrado no Quadro 1.

Quadro 1 – Valores de WI para diferentes composições de ferro.

Material	WI
Minério de ferro	15,4
Minério de pirita	8,9
Hematita	12,7
Hematita – Especular	15,4
Hematita – Oolítica	11,3
Hematita – Magnetita	10,2
Hematita – Taconita	14,9

Fonte: Metso (2005).

Observando tais valores, adota-se o maior e menor WI para o ponto experimental com o maior e menor SPI respectivamente. Cabe comentar que SPI (“SAG Power Index”) é o índice equivalente ao WI e que foi obtido por Behnamfard, Roudi e Veglio (2020), bem como P_{80} . Na sequência, calcula-se o WI para os outros pontos através de interpolações, dadas pela Equação 1.

$$WI = 8,9 + \left[\frac{6,54 (SPI - 58)}{54} \right] \quad (1)$$

O próximo passo, como descrito em Gupta e Yan (2016), seria calcular a alimentação F_{80} para cada ponto experimental. No presente estudo, estima-se a F_{80} pelas equações do $F_{ótimo}$ para barras e bolas, as quais são dadas pelas Equações 2 e 3, respectivamente.

$$F_{ótimo,barras} = 1600 \sqrt{\frac{14,3}{WI}} \quad (2)$$

$$F_{ótimo,bolas} = 4000 \sqrt{\frac{14,3}{WI}} \quad (3)$$

Com os valores de F_{80} calculados para cada ponto experimental, então pode-se calcular a energia através da Equação 4.

$$E = WI \left[\frac{10}{\sqrt{P_{80}}} - \frac{10}{\sqrt{F_{80}}} \right] \quad (4)$$

Então a potência (P) pode ser estimada por um produto da energia (E) pela vazão (Q) dada pela Equação 5.

$$P = Q.E \quad (5)$$

De posse das equações anteriores e o procedimento apresentado, junto dos dados experimentais para Q, SPI e P₈₀ é possível estimar a potência para moinhos de barras e bolas. As Tabelas 2 e 3 são os resultados para o moinho de barras e o moinho de bolas, respectivamente. No atual caso, os valores de F₈₀ são diferentes para os tipos de moinhos estudados e, conseqüentemente, os valores de E e P também.

Tabela 2 – Estimativa para moinho de barras.

Q (t/h)	SPI (min)	P ₈₀ (µm)	WI	F ₈₀ (µm)	E (kWh/t)	P (kW)
370,31	94,00	432,00	13,26	1661,56	3,13	1157,85
375,49	112,00	611,00	15,44	1539,80	2,31	867,99
637,29	92,00	619,00	13,02	1676,95	2,05	1308,60
601,24	94,00	374,00	13,26	1661,56	3,60	2166,61
400,31	74,00	317,00	10,84	1837,88	3,56	1424,73
439,62	76,00	335,00	11,08	1817,68	3,45	1518,80
459,62	102,00	322,00	14,23	1603,99	4,38	2011,60
421,19	98,00	365,00	13,74	1632,02	3,79	1597,12
495,07	84,00	485,00	12,05	1743,07	2,59	1279,84
524,44	94,00	736,00	13,26	1661,56	1,63	857,30
561,08	84,00	396,00	12,05	1743,07	3,17	1777,97
486,06	76,00	494,00	11,08	1817,68	2,39	1159,88
415,19	70,00	324,00	10,35	1880,39	3,36	1396,82
472,56	78,00	327,00	11,32	1798,13	3,59	1697,03
492,96	82,00	698,00	11,81	1760,86	1,66	815,98
534,74	78,00	527,00	11,32	1798,13	2,26	1209,57
683,18	92,00	498,00	13,02	1676,95	2,65	1813,50
521,47	58,00	335,00	8,90	2028,12	2,89	1505,14
565,35	60,00	229,00	9,14	2001,07	4,00	2260,06
553,70	65,00	475,00	9,75	1937,92	2,26	1250,41
511,39	108,00	588,00	14,96	1564,54	2,39	1220,46

Fonte: A autora.

Tabela 3 – Estimativa para moinho de bolas.

Q (t/h)	SPI (min)	P ₈₀ (µm)	WI	F ₈₀ (µm)	E (kWh/t)	P (kW)
370,31	94,00	432,00	13,26	4153,90	4,32	1600,60
375,49	112,00	611,00	15,44	3849,50	3,76	1411,02
637,29	92,00	619,00	13,02	4192,37	3,22	2053,20
601,24	94,00	374,00	13,26	4153,90	4,80	2885,47
400,31	74,00	317,00	10,84	4594,71	4,49	1796,69
439,62	76,00	335,00	11,08	4544,21	4,41	1938,72
459,62	102,00	322,00	14,23	4009,98	5,68	2611,78
421,19	98,00	365,00	13,74	4080,04	5,04	2123,81
495,07	84,00	485,00	12,05	4357,67	3,65	1804,97
524,44	94,00	736,00	13,26	4153,90	2,83	1484,33
561,08	84,00	396,00	12,05	4357,67	4,23	2373,12
486,06	76,00	494,00	11,08	4544,21	3,34	1624,16
415,19	70,00	324,00	10,35	4700,97	4,24	1761,16
472,56	78,00	327,00	11,32	4495,34	4,57	2160,79
492,96	82,00	698,00	11,81	4402,15	2,69	1325,77
534,74	78,00	527,00	11,32	4495,34	3,24	1734,35
683,18	92,00	498,00	13,02	4192,37	3,82	2611,72
521,47	58,00	335,00	8,90	5070,29	3,61	1883,91
565,35	60,00	229,00	9,14	5002,67	4,75	2684,73
553,70	65,00	475,00	9,75	4844,79	3,07	1701,04
511,39	108,00	588,00	14,96	3911,35	3,78	1931,13

Fonte: A autora.

Conhecendo os valores reais para energia e potência encontrados em Behnamfard, Roudi e Veglio (2020), calcula-se os erros absolutos (Equação 6) e relativos (Equação 7) para os moinhos de barras e bolas, mostrados nas Tabela 4.

$$\text{Erro absoluto} = P_{real} - P \quad (6)$$

$$\text{Erro relativo} = \frac{\text{Erro absoluto}}{P_{real}} \cdot 100 \quad (7)$$

Tabela 4 – Erros para os moinhos de barras e bolas.

Dados		Moinho de Barras			Moinho de Bolas		
Q (t/h)	P _{real} (kW)	P (kW)	Erro	Erro	P (kW)	Erro	Erro
			absoluto (kW)	relativo (%)		absoluto (kW)	relativo (%)
370,31	3211,51	1157,85	2053,66	63,95	1600,60	1610,91	50,16
375,49	3562,11	867,99	2694,12	75,63	1411,02	2151,09	60,39
637,29	5403,13	1308,60	4094,53	75,78	2053,20	3349,93	62,00
601,24	4927,75	2166,61	2761,14	56,03	2885,47	2042,28	41,44
400,31	2852,41	1424,73	1427,68	50,05	1796,69	1055,72	37,01
439,62	3257,00	1518,80	1738,20	53,37	1938,72	1318,28	40,48
459,62	4263,13	2011,60	2251,53	52,81	2611,78	1651,35	38,74
421,19	3686,16	1597,12	2089,04	56,67	2123,81	1562,35	42,38
495,07	4009,77	1279,84	2729,93	68,08	1804,97	2204,80	54,99
524,44	4671,33	857,30	3814,03	81,65	1484,33	3187,00	68,22
561,08	4290,57	1777,97	2512,60	58,56	2373,12	1917,45	44,69
486,06	3558,38	1159,88	2398,50	67,40	1624,16	1934,22	54,36
415,19	2946,86	1396,82	1550,04	52,60	1761,16	1185,70	40,24
472,56	3434,34	1697,03	1737,31	50,59	2160,79	1273,55	37,08
492,96	3563,07	815,98	2747,09	77,10	1325,77	2237,30	62,79
534,74	4053,49	1209,57	2843,92	70,16	1734,35	2319,14	57,21
683,18	5987,72	1813,50	4174,22	69,71	2611,72	3376,00	56,38
521,47	3457,62	1505,14	1952,48	56,47	1883,91	1573,71	45,51
565,35	3889,08	2260,06	1629,02	41,89	2684,73	1204,35	30,97
553,70	3902,09	1250,41	2651,68	67,96	1701,04	2201,05	56,41
511,39	4817,98	1220,46	3597,52	74,67	1931,13	2886,85	59,92

Fonte: A autora.

2.2 Com aplicação dos fatores de correção

Os fatores de correção são aplicados com a intenção de corrigir os resultados de estimativas feitas pelo método de Bond em condições diferentes daquelas em que se desenvolveu o método. Ao todo são oito fatores de correção analisados para os moinhos do presente estudo.

O primeiro fator (F1) não se aplica nem no moinho de barras e nem no moinho de bolas, pois a moagem é conduzida em via úmida.

O segundo fator (F2) também não se aplica, pois a moagem é realizada em circuito fechado no moinho de bolas.

O terceiro fator (F3) não se aplica, desde que para o caso vamos supor um diâmetro interno de 2,44 m.

O quarto fator (F4) não se aplica, como a estimativa do F_{80} foi feita através do $F_{\text{ótimo}}$, o F4 terá o valor de 1.

O quinto fator (F5) é utilizado somente em moinhos de bolas e, nesse caso, é aplicado, já que mais de 80% do produto é menor que 75 μm . O valor do F5 é dado pela Equação 8.

$$F5 = \frac{P_{80} + 10,3}{1,145 \cdot P_{80}} \quad (8)$$

O sexto fator (F6) é utilizado somente em moinhos de barras e, nesse caso, é aplicado. O mesmo é calculado com base na Equação 9.

$$F6 = 1 + \frac{(R - R^*)^2}{150} \quad (9)$$

Sendo a razão de redução (R) e a razão ótima de redução (R^*) calculadas pelas Equações 10 e 11, respectivamente. Aplicando o F6 quando $R < R^* - 2$ ou $R > R^* + 2$.

$$R = \frac{F_{80}}{P_{80}} \quad (10)$$

$$R^* = 8 + \frac{5L}{D} \quad (11)$$

Em que L é o comprimento da barra e D o diâmetro interno do moinho, ambos em metros.

O sétimo fator (F7) é utilizado somente em moinhos de bolas e, nesse caso, é aplicado somente quando o R é menor do que 6. Calcula-se o F7 pela Equação 12.

$$F7 = \frac{2(R - 1,35) + 0,26}{2(R - 1,35)} \quad (12)$$

O oitavo e último fator (F8) é utilizado somente em moinhos de barras e, nesse caso, é aplicado, pois o moinho opera isoladamente sendo alimentado por um circuito fechado e, por isso, o valor do F8 é igual a 1,2.

Após analisar e estabelecer todos os fatores, calcula-se o fator de correção total pela Equação 13.

$$FT = F1. F2. F3. F4. F5. F6. F7. F8 \quad (13)$$

Então calcula-se o novo valor para potência, usando o fator de correção, utilizando a Equação 14.

$$P = Q. E. FT \quad (14)$$

Os novos valores para potência são mostrados nas Tabelas 5 e 6, sendo respectivamente para barras e bolas. O valor para L obtido em Metso (2005) para um D de 2,44 m foi de 3,51 m.

Tabela 5 – Estimativa para moinho de barras com fatores de correção.

Q (t/h)	P ₈₀ (µm)	WI	F ₈₀ (µm)	R	R*	E (kWh/t)	F6	F8	FT	P (kW)
370,31	432,00	13,26	1661,56	3,85	15,19	3,13	1,86	1,20	2,23	2581,93
375,49	611,00	15,44	1539,80	2,52	15,19	2,31	2,07	1,20	2,48	2156,73
637,29	619,00	13,02	1676,95	2,71	15,19	2,05	2,04	1,20	2,45	3201,76
601,24	374,00	13,26	1661,56	4,44	15,19	3,60	1,77	1,20	2,12	4602,95
400,31	317,00	10,84	1837,88	5,80	15,19	3,56	1,59	1,20	1,91	2715,70
439,62	335,00	11,08	1817,68	5,43	15,19	3,45	1,64	1,20	1,96	2981,57
459,62	322,00	14,23	1603,99	4,98	15,19	4,38	1,70	1,20	2,03	4091,92
421,19	365,00	13,74	1632,02	4,47	15,19	3,79	1,77	1,20	2,12	3385,23
495,07	485,00	12,05	1743,07	3,59	15,19	2,59	1,90	1,20	2,28	2913,21
524,44	736,00	13,26	1661,56	2,26	15,19	1,63	2,12	1,20	2,54	2176,27
561,08	396,00	12,05	1743,07	4,40	15,19	3,17	1,78	1,20	2,13	3789,84
486,06	494,00	11,08	1817,68	3,68	15,19	2,39	1,88	1,20	2,26	2621,80
415,19	324,00	10,35	1880,39	5,80	15,19	3,36	1,59	1,20	1,91	2661,24
472,56	327,00	11,32	1798,13	5,50	15,19	3,59	1,63	1,20	1,95	3312,18

492,96	698,00	11,81	1760,86	2,52	15,19	1,66	2,07	1,20	2,48	2027,07
534,74	527,00	11,32	1798,13	3,41	15,19	2,26	1,93	1,20	2,31	2794,43
683,18	498,00	13,02	1676,95	3,37	15,19	2,65	1,93	1,20	2,32	4204,96
521,47	335,00	8,90	2028,12	6,05	15,19	2,89	1,56	1,20	1,87	2811,75
565,35	229,00	9,14	2001,07	8,74	15,19	4,00	1,28	1,20	1,53	3465,28
553,70	475,00	9,75	1937,92	4,08	15,19	2,26	1,82	1,20	2,19	2735,84
511,39	588,00	14,96	1564,54	2,66	15,19	2,39	2,05	1,20	2,46	2997,90

Fonte: A autora.

Tabela 6 – Estimativa para moinho de bolas com fatores de correção.

Q (t/h)	P ₈₀ (μm)	WI	F ₈₀ (μm)	R	E (kWh/t)	F5	F7	FT	P (kW)
370,31	432,00	13,26	4153,90	9,62	4,32	0,89	1,00	0,89	1431,24
375,49	611,00	15,44	3849,50	6,30	3,76	0,89	1,00	0,89	1253,11
637,29	619,00	13,02	4192,37	6,77	3,22	0,89	1,00	0,89	1823,03
601,24	374,00	13,26	4153,90	11,11	4,80	0,90	1,00	0,90	2589,46
400,31	317,00	10,84	4594,71	14,49	4,49	0,90	1,00	0,90	1620,14
439,62	335,00	11,08	4544,21	13,56	4,41	0,90	1,00	0,90	1745,27
459,62	322,00	14,23	4009,98	12,45	5,68	0,90	1,00	0,90	2353,99
421,19	365,00	13,74	4080,04	11,18	5,04	0,90	1,00	0,90	1907,20
495,07	485,00	12,05	4357,67	8,98	3,65	0,89	1,00	0,89	1609,87
524,44	736,00	13,26	4153,90	5,64	2,83	0,89	1,03	0,91	1354,30
561,08	396,00	12,05	4357,67	11,00	4,23	0,90	1,00	0,90	2126,50
486,06	494,00	11,08	4544,21	9,20	3,34	0,89	1,00	0,89	1448,05
415,19	324,00	10,35	4700,97	14,51	4,24	0,90	1,00	0,90	1587,03
472,56	327,00	11,32	4495,34	13,75	4,57	0,90	1,00	0,90	1946,59
492,96	698,00	11,81	4402,15	6,31	2,69	0,89	1,00	0,89	1174,96
534,74	527,00	11,32	4495,34	8,53	3,24	0,89	1,00	0,89	1544,32
683,18	498,00	13,02	4192,37	8,42	3,82	0,89	1,00	0,89	2328,16
521,47	335,00	8,90	5070,29	15,14	3,61	0,90	1,00	0,90	1695,93
565,35	229,00	9,14	5002,67	21,85	4,75	0,91	1,00	0,91	2450,20
553,70	475,00	9,75	4844,79	10,20	3,07	0,89	1,00	0,89	1517,84
511,39	588,00	14,96	3911,35	6,65	3,78	0,89	1,00	0,89	1716,12

Fonte: A autora.

Os erros absolutos e relativos são mostrados na Tabela 7.

Tabela 7 – Erros para os moinhos de barras e bolas com fatores de correção.

Dados		Barras			Bolas		
Q (t/h)	P _{real} (kW)	P (kW)	Erro	Erro	P (kW)	Erro	Erro
			absoluto	relativo		absoluto	relativo
			(kW)	(%)		(kW)	(%)
370,31	3211,51	2581,93	629,58	19,60	1431,24	1780,27	55,43
375,49	3562,11	2156,73	1405,38	39,45	1253,11	2309,00	64,82
637,29	5403,13	3201,76	2201,37	40,74	1823,03	3580,10	66,26
601,24	4927,75	4602,95	324,80	6,59	2589,46	2338,29	47,45
400,31	2852,41	2715,70	136,71	4,79	1620,14	1232,27	43, 20
439,62	3257,00	2981,57	275,43	8,46	1745,27	1511,73	46,41
459,62	4263,13	4091,92	171,21	4,02	2353,99	1909,14	44,78
421,19	3686,16	3385,23	300,93	8,16	1907,20	1778,96	48,26
495,07	4009,77	2913,21	1096,56	27,35	1609,87	2399,90	59,85
524,44	4671,33	2176,27	2495,06	53,41	1354,30	3317,03	71,01
561,08	4290,57	3789,84	500,73	11,67	2126,50	2164,07	50,44
486,06	3558,38	2621,80	936,58	26,32	1448,05	2110,33	59,31
415,19	2946,86	2661,24	285,62	9,69	1587,03	1359,83	46,15
472,56	3434,34	3312,18	122,16	3,56	1946,59	1487,75	43,32
492,96	3563,07	2027,07	1536,00	43,11	1174,96	2388,11	67,02
534,74	4053,49	2794,43	1259,06	31,06	1544,32	2509,17	61,90
683,18	5987,72	4204,96	1782,76	29,77	2328,16	3659,56	61,12
521,47	3457,62	2811,75	645,87	18,68	1695,93	1761,69	50,95
565,35	3889,08	3465,28	423,80	10,90	2450,20	1438,88	37,00
553,70	3902,09	2735,84	1166,25	29,89	1517,84	2384,25	61,10
511,39	4817,98	2997,90	1820,08	37,78	1716,12	3101,86	64,38

Fonte: A autora.

2.3 Aplicação dos fatores de correção propondo D=4,37 m

Com a proposta de um novo diâmetro interno ao revestimento e, principalmente, diferente de 2,44 m, o F3 passa a ser válido e o F6 tem o seu valor alterado devido a mudança no comprimento das barras. Segundo Metso (2005), para um D diferente de 2,44 m e maior do

que 3,81 m, o valor de F3 é 0,914; e para o D=4,37 m proposto o novo valor de L é igual a 5,94 m. Os novos valores de P são mostrados nas Tabelas 8 e 9, para barras e bolas respectivamente.

Tabela 8 – Estimativa para moinho de barras para D=4,37 m.

Q (t/h)	P ₈₀ (µm)	WI	F ₈₀ (µm)	R	R*	E (kWh/t)	F3	F6	F8	FT	P (kW)
370,31	432,00	13,26	1661,56	3,85	14,80	3,13	0,914	1,80	1,20	1,97	2285,08
375,49	611,00	15,44	1539,80	2,52	14,80	2,31	0,914	2,00	1,20	2,20	1908,50
637,29	619,00	13,02	1676,95	2,71	14,80	2,05	0,914	1,97	1,20	2,17	2833,24
601,24	374,00	13,26	1661,56	4,44	14,80	3,60	0,914	1,71	1,20	1,88	4074,60
400,31	317,00	10,84	1837,88	5,80	14,80	3,56	0,914	1,54	1,20	1,69	2406,22
439,62	335,00	11,08	1817,68	5,43	14,80	3,45	0,914	1,59	1,20	1,74	2640,93
459,62	322,00	14,23	1603,99	4,98	14,80	4,38	0,914	1,64	1,20	1,80	3623,28
421,19	365,00	13,74	1632,02	4,47	14,80	3,79	0,914	1,71	1,20	1,88	2996,70
495,07	485,00	12,05	1743,07	3,59	14,80	2,59	0,914	1,84	1,20	2,01	2578,11
524,44	736,00	13,26	1661,56	2,26	14,80	1,63	0,914	2,05	1,20	2,25	1925,83
561,08	396,00	12,05	1743,07	4,40	14,80	3,17	0,914	1,72	1,20	1,89	3354,77
486,06	494,00	11,08	1817,68	3,68	14,80	2,39	0,914	1,82	1,20	2,00	2320,27
415,19	324,00	10,35	1880,39	5,80	14,80	3,36	0,914	1,54	1,20	1,69	2357,97
472,56	327,00	11,32	1798,13	5,50	14,80	3,59	0,914	1,58	1,20	1,73	2933,95
492,96	698,00	11,81	1760,86	2,52	14,80	1,66	0,914	2,00	1,20	2,20	1793,77
534,74	527,00	11,32	1798,13	3,41	14,80	2,26	0,914	1,86	1,20	2,04	2472,91
683,18	498,00	13,02	1676,95	3,37	14,80	2,65	0,914	1,87	1,20	2,05	3721,14
521,47	335,00	8,90	2028,12	6,05	14,80	2,89	0,914	1,51	1,20	1,66	2491,95
565,35	229,00	9,14	2001,07	8,74	14,80	4,00	0,914	1,24	1,20	1,37	3085,32
553,70	475,00	9,75	1937,92	4,08	14,80	2,26	0,914	1,77	1,20	1,94	2421,46
511,39	588,00	14,96	1564,54	2,66	14,80	2,39	0,914	1,98	1,20	2,17	2652,84

Fonte: A autora.

Tabela 9 – Estimativa para moinho de bolas para D=4,37 m.

Q (t/h)	P ₈₀ (µm)	WI	F ₈₀ (µm)	R	E (kWh/t)	F3	F5	F7	FT	P (kW)
370,31	432,00	13,26	4153,90	9,62	4,32	0,914	0,89	1,00	0,82	1308,15
375,49	611,00	15,44	3849,50	6,30	3,76	0,914	0,89	1,00	0,81	1145,34
637,29	619,00	13,02	4192,37	6,77	3,22	0,914	0,89	1,00	0,81	1666,25

601,24	374,00	13,26	4153,90	11,11	4,80	0,914	0,90	1,00	0,82	2366,77
400,31	317,00	10,84	4594,71	14,49	4,49	0,914	0,90	1,00	0,82	1480,81
439,62	335,00	11,08	4544,21	13,56	4,41	0,914	0,90	1,00	0,82	1595,17
459,62	322,00	14,23	4009,98	12,45	5,68	0,914	0,90	1,00	0,82	2151,55
421,19	365,00	13,74	4080,04	11,18	5,04	0,914	0,90	1,00	0,82	1743,18
495,07	485,00	12,05	4357,67	8,98	3,65	0,914	0,89	1,00	0,82	1471,42
524,44	736,00	13,26	4153,90	5,64	2,83	0,914	0,89	1,03	0,83	1237,83
561,08	396,00	12,05	4357,67	11,00	4,23	0,914	0,90	1,00	0,82	1943,62
486,06	494,00	11,08	4544,21	9,20	3,34	0,914	0,89	1,00	0,81	1323,52
415,19	324,00	10,35	4700,97	14,51	4,24	0,914	0,90	1,00	0,82	1450,54
472,56	327,00	11,32	4495,34	13,75	4,57	0,914	0,90	1,00	0,82	1779,18
492,96	698,00	11,81	4402,15	6,31	2,69	0,914	0,89	1,00	0,81	1073,91
534,74	527,00	11,32	4495,34	8,53	3,24	0,914	0,89	1,00	0,81	1411,51
683,18	498,00	13,02	4192,37	8,42	3,82	0,914	0,89	1,00	0,81	2127,94
521,47	335,00	8,90	5070,29	15,14	3,61	0,914	0,90	1,00	0,82	1550,08
565,35	229,00	9,14	5002,67	21,85	4,75	0,914	0,91	1,00	0,83	2239,49
553,70	475,00	9,75	4844,79	10,20	3,07	0,914	0,89	1,00	0,82	1387,31
511,39	588,00	14,96	3911,35	6,65	3,78	0,914	0,89	1,00	0,81	1568,53

Fonte: A autora.

Os erros absolutos e relativos estão listados na Tabela 10.

Tabela 10 – Erros para os moinhos de barras e bolas com D=4,37 m.

Dados		Barras			Bolas		
Q (t/h)	P _{real} (kW)	P (kW)	Erro	Erro	P (kW)	Erro	Erro
			absoluto (kW)	relativo (%)		absoluto (kW)	relativo (%)
370,31	3211,51	2285,08	926,43	28,85	1308,15	1903,36	59,27
375,49	3562,11	1908,50	1653,61	46,42	1145,34	2416,77	67,85
637,29	5403,13	2833,24	2569,89	47,56	1666,25	3736,88	69,16
601,24	4927,75	4074,60	853,15	17,31	2366,77	2560,98	51,97
400,31	2852,41	2406,22	446,19	15,64	1480,81	1371,60	48,09
439,62	3257,00	2640,93	616,07	18,92	1595,17	1661,83	51,02

459,62	4263,13	3623,28	639,85	15,01	2151,55	2111,58	49,53
421,19	3686,16	2996,70	689,46	18,70	1743,18	1942,98	52,71
495,07	4009,77	2578,11	1431,66	35,70	1471,42	2538,35	63,30
524,44	4671,33	1925,83	2745,50	58,77	1237,83	3433,50	73,50
561,08	4290,57	3354,77	935,80	21,81	1943,62	2346,95	54,70
486,06	3558,38	2320,27	1238,11	34,79	1323,52	2234,86	62,81
415,19	2946,86	2357,97	588,89	19,98	1450,54	1496,32	50,78
472,56	3434,34	2933,95	500,39	14,57	1779,18	1655,16	48,19
492,96	3563,07	1793,77	1769,30	49,66	1073,91	2489,16	69,86
534,74	4053,49	2472,91	1580,58	38,99	1411,51	2641,98	65,18
683,18	5987,72	3721,14	2266,58	37,85	2127,94	3859,78	64,46
521,47	3457,62	2491,95	965,67	27,93	1550,08	1907,54	55,17
565,35	3889,08	3085,32	803,76	20,67	2239,49	1649,59	42,42
553,70	3902,09	2421,46	1480,63	37,94	1387,31	2514,78	64,45
511,39	4817,98	2652,84	2165,14	44,94	1568,53	3249,45	67,44

Fonte: A autora.

2.4 Aplicação dos fatores de correção propondo D=1,10 m

A fim de avaliar o consumo energético e a potência requerida pelos moinhos em função do diâmetro interno de revestimento, propõe-se um novo valor de 1,10 m para o diâmetro, com isso em Metso (2005), para um D de 1,10 m o valor de F3 é 1,17; e o novo valor de L é aproximadamente 1,741 m. Os novos valores de P são mostrados nas Tabelas 11 e 12, para barras e bolas, respectivamente.

Tabela 11 – Estimativa para moinho de barras para D=1,10 m.

Q (t/h)	P ₈₀ (µm)	WI	F ₈₀ (µm)	R	R*	E (kWh/t)	F3	F6	F8	FT	P (kW)
370,31	432,00	13,26	1661,56	3,85	15,91	3,13	1,17	1,97	1,20	2,77	3203,81
375,49	611,00	15,44	1539,80	2,52	15,91	2,31	1,17	2,20	1,20	3,08	2676,06
637,29	619,00	13,02	1676,95	2,71	15,91	2,05	1,17	2,16	1,20	3,04	3972,92
601,24	374,00	13,26	1661,56	4,44	15,91	3,60	1,17	1,88	1,20	2,64	5710,36
400,31	317,00	10,84	1837,88	5,80	15,91	3,56	1,17	1,68	1,20	2,36	3364,97
439,62	335,00	11,08	1817,68	5,43	15,91	3,45	1,17	1,73	1,20	2,43	3696,04
459,62	322,00	14,23	1603,99	4,98	15,91	4,38	1,17	1,80	1,20	2,52	5074,58

421,19	365,00	13,74	1632,02	4,47	15,91	3,79	1,17	1,87	1,20	2,63	4199,61
495,07	485,00	12,05	1743,07	3,59	15,91	2,59	1,17	2,01	1,20	2,82	3615,04
524,44	736,00	13,26	1661,56	2,26	15,91	1,63	1,17	2,24	1,20	3,15	2700,09
561,08	396,00	12,05	1743,07	4,40	15,91	3,17	1,17	1,88	1,20	2,64	4701,73
486,06	494,00	11,08	1817,68	3,68	15,91	2,39	1,17	2,00	1,20	2,80	3253,39
415,19	324,00	10,35	1880,39	5,80	15,91	3,36	1,17	1,68	1,20	2,36	3297,46
472,56	327,00	11,32	1798,13	5,50	15,91	3,59	1,17	1,72	1,20	2,42	4105,55
492,96	698,00	11,81	1760,86	2,52	15,91	1,66	1,17	2,20	1,20	3,08	2515,19
534,74	527,00	11,32	1798,13	3,41	15,91	2,26	1,17	2,04	1,20	2,87	3467,69
683,18	498,00	13,02	1676,95	3,37	15,91	2,65	1,17	2,05	1,20	2,88	5218,08
521,47	335,00	8,90	2028,12	6,05	15,91	2,89	1,17	1,65	1,20	2,31	3482,72
565,35	229,00	9,14	2001,07	8,74	15,91	4,00	1,17	1,34	1,20	1,89	4262,26
553,70	475,00	9,75	1937,92	4,08	15,91	2,26	1,17	1,93	1,20	2,71	3394,57
511,39	588,00	14,96	1564,54	2,66	15,91	2,39	1,17	2,17	1,20	3,05	3719,92

Fonte: A autora.

Tabela 12 – Estimativa para moinho de bolas para D=1,10 m.

Q (t/h)	P ₈₀ (µm)	WI	F ₈₀ (µm)	R	E (kWh/t)	F3	F5	F7	FT	P (kW)
370,31	432,00	13,26	4153,90	9,62	4,32	1,17	0,89	1,00	1,05	1674,55
375,49	611,00	15,44	3849,50	6,30	3,76	1,17	0,89	1,00	1,04	1466,14
637,29	619,00	13,02	4192,37	6,77	3,22	1,17	0,89	1,00	1,04	2132,94
601,24	374,00	13,26	4153,90	11,11	4,80	1,17	0,90	1,00	1,05	3029,67
400,31	317,00	10,84	4594,71	14,49	4,49	1,17	0,90	1,00	1,06	1895,57
439,62	335,00	11,08	4544,21	13,56	4,41	1,17	0,90	1,00	1,05	2041,96
459,62	322,00	14,23	4009,98	12,45	5,68	1,17	0,90	1,00	1,05	2754,17
421,19	365,00	13,74	4080,04	11,18	5,04	1,17	0,90	1,00	1,05	2231,42
495,07	485,00	12,05	4357,67	8,98	3,65	1,17	0,89	1,00	1,04	1883,54
524,44	736,00	13,26	4153,90	5,64	2,83	1,17	0,89	1,03	1,07	1584,53
561,08	396,00	12,05	4357,67	11,00	4,23	1,17	0,90	1,00	1,05	2488,01
486,06	494,00	11,08	4544,21	9,20	3,34	1,17	0,89	1,00	1,04	1694,22
415,19	324,00	10,35	4700,97	14,51	4,24	1,17	0,90	1,00	1,05	1856,82
472,56	327,00	11,32	4495,34	13,75	4,57	1,17	0,90	1,00	1,05	2277,51
492,96	698,00	11,81	4402,15	6,31	2,69	1,17	0,89	1,00	1,04	1374,70

534,74	527,00	11,32	4495,34	8,53	3,24	1,17	0,89	1,00	1,04	1806,85
683,18	498,00	13,02	4192,37	8,42	3,82	1,17	0,89	1,00	1,04	2723,94
521,47	335,00	8,90	5070,29	15,14	3,61	1,17	0,90	1,00	1,05	1984,23
565,35	229,00	9,14	5002,67	21,85	4,75	1,17	0,91	1,00	1,07	2866,74
553,70	475,00	9,75	4844,79	10,20	3,07	1,17	0,89	1,00	1,04	1775,87
511,39	588,00	14,96	3911,35	6,65	3,78	1,17	0,89	1,00	1,04	2007,86

Fonte: A autora.

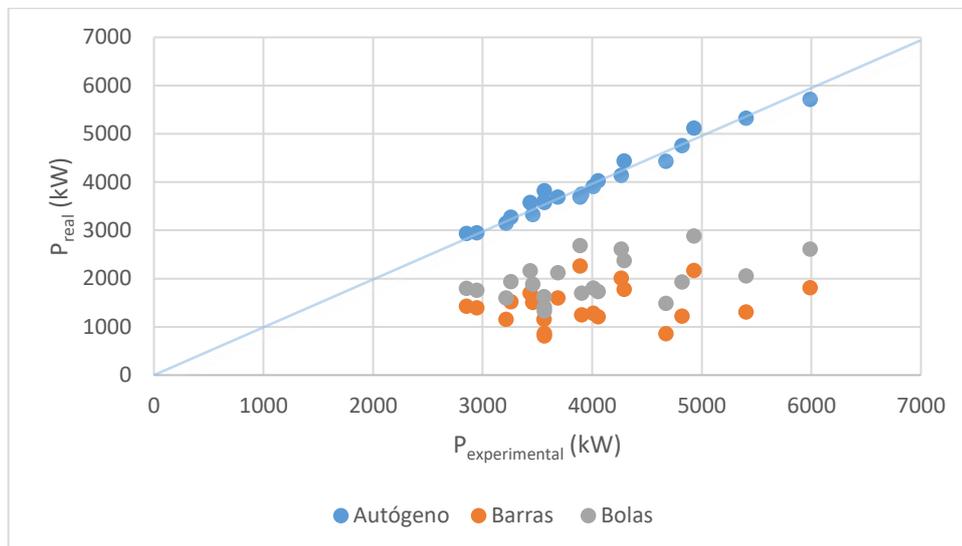
3 DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

Ao fazer-se a análise dos resultados obtidos, foram consideradas nove comparações.

3.1 Comparação do moinho autógeno com o de barras e bolas sem correção

Plotou-se um gráfico da potência real pela potência estimada e traçou-se uma reta que representa os dados reais apresentados por Behnamfard, Roudi e Veglio (2020). Na Figura 2 é apresentado o gráfico descrito anteriormente para as potências estimadas sem o uso dos fatores de correção.

Figura 2 – Potência real em função das potências estimadas sem fator de correção.



Fonte: A autora.

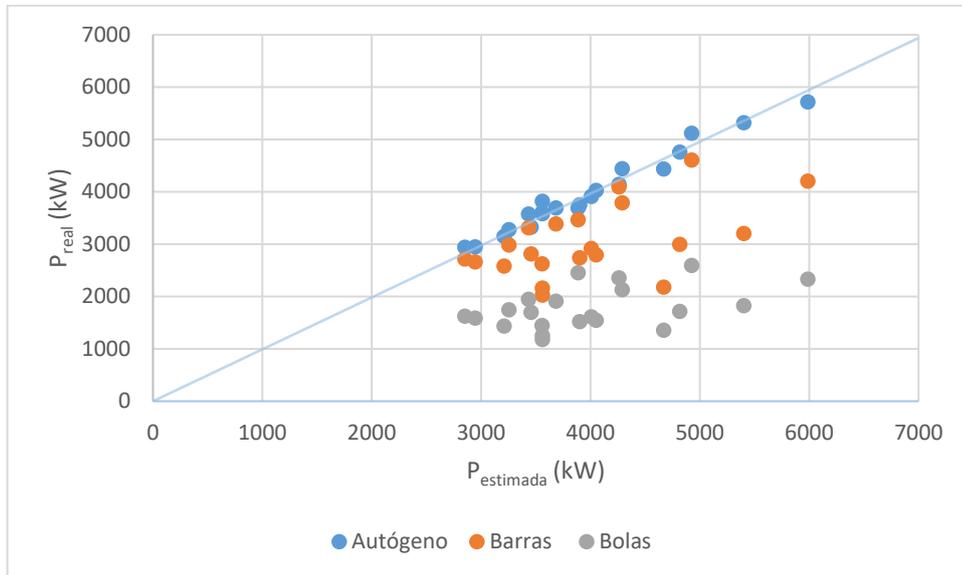
Na Figura 2 é mostrado que, de uma forma geral, ambos os moinhos gastam cerca de 50% de energia a menos que o autógeno para realizar a mesma cominuição. Em adição, o moinho de barras se apresenta como o mais econômico em comparação ao de bolas, na substituição do autógeno. Esta avaliação ainda carece do estudo de aplicação dos fatores de correção que vem a seguir.

3.2 Comparação do moinho autógeno com o de barras e bolas com correção

Visando uma comparação, plotou-se um gráfico da potência real em função da potência estimada e, como no caso anterior, traçou-se uma reta que representa os dados reais

apresentados por Behnamfard, Roudi e Veglio (2020). Na Figura 3 é mostrado o gráfico descrito para as potências estimadas com o uso dos fatores de correção.

Figura 3 – Potência real em função das potências estimadas com fator de correção.



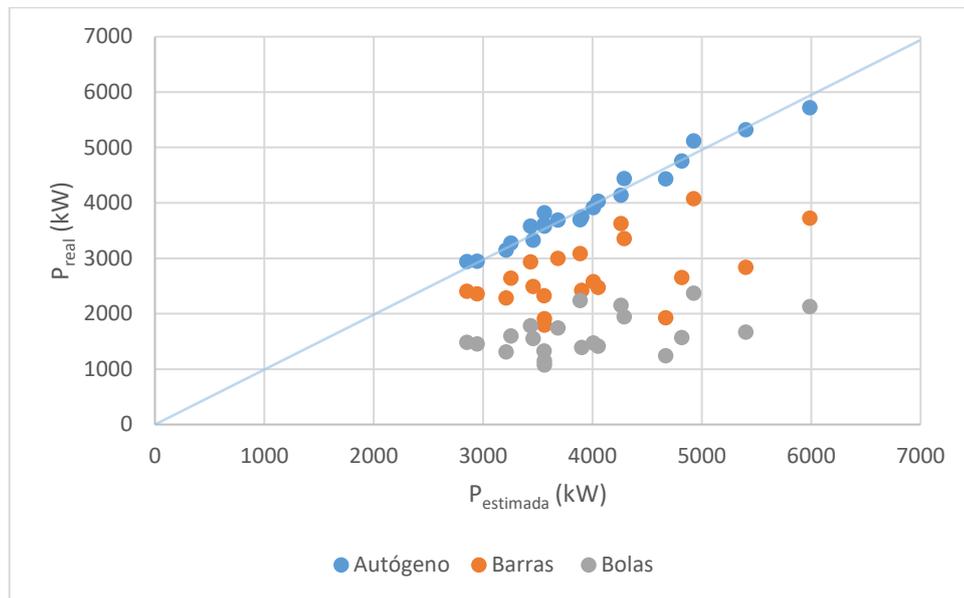
Fonte: A autora.

Aplicando os fatores de correção e propondo um diâmetro interno igual ao utilizado por Bond, melhora consideravelmente a aproximação do moinho de barras enquanto o de bolas melhora minimamente. Embora o de barras tenha melhorado muito, o moinho autógeno estimado pelo método Minnovex modificado continua mais próximo dos valores reais.

3.3 Comparação do moinho autógeno com o de barras e bolas com correção (D=4,37 m)

No gráfico da potência real em relação as potências estimadas com correção para um diâmetro de 4,37 m, mostrado na Figura 4, observa-se uma pequena variação, que distancia o moinho de barras. O moinho de bolas continua longe do desejado.

Figura 4 – Potência real em função das potências estimadas com fator de correção e $D=4,37\text{m}$.

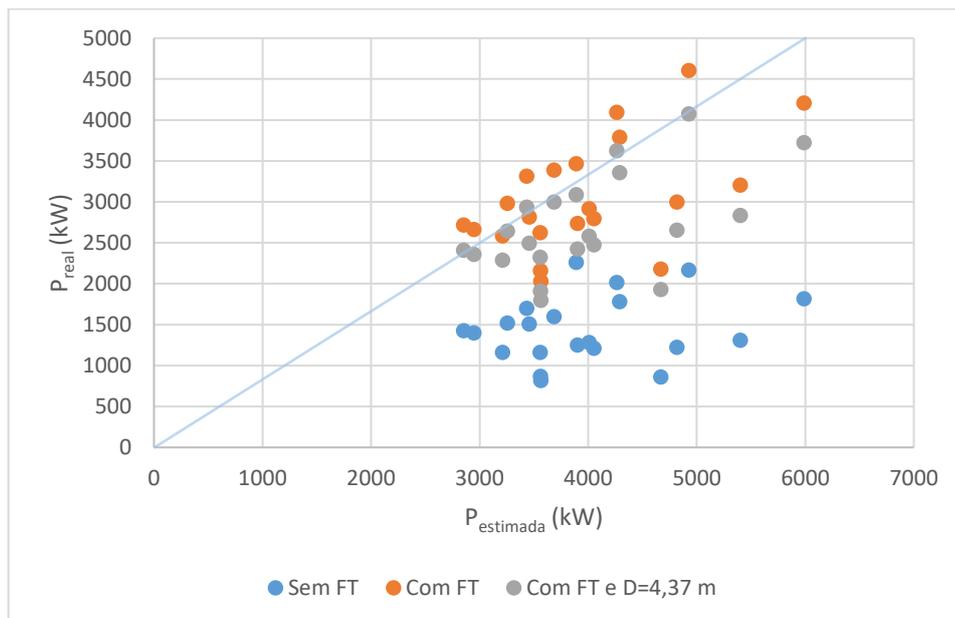


Fonte: A autora.

3.4 Comparação das estimativas para o moinho de barras

Na Figura 5 é apresentado o comparativo das estimativas feitas no presente estudo para potências do moinho de barras.

Figura 5 – Estimativas de potência para moinho de barras.



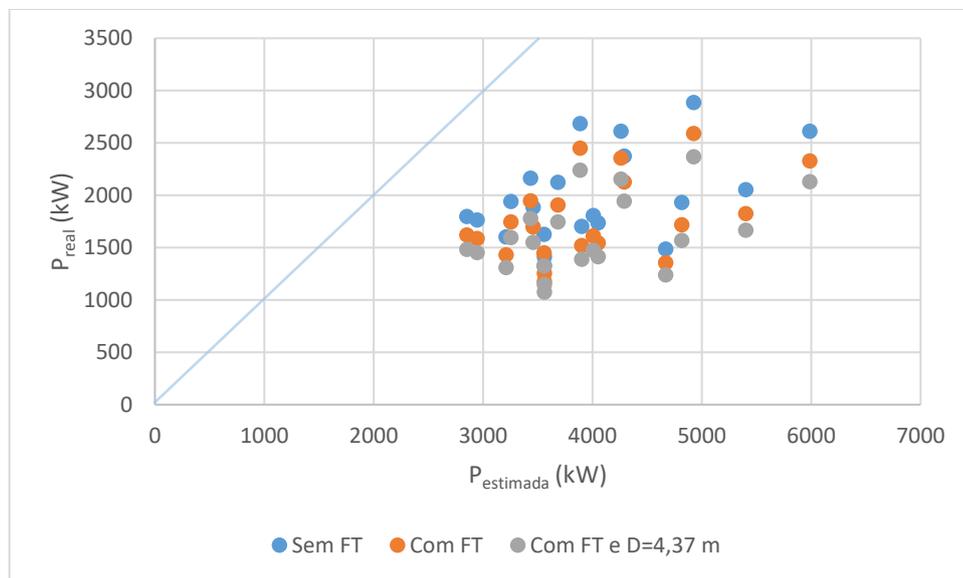
Fonte: A autora.

A análise do gráfico mostra claramente que o uso dos fatores de correção melhora as estimativas das potências do moinho de barras no caso estudado, o que se era esperado. A estimativa sem a aplicação dos fatores de correção apresenta resultados mais afastados segundo a expectativa inerente à proposta da inserção dos referidos num projeto.

3.5 Comparação das estimativas para o moinho de bolas

Na Figura 6 é apresentado, como na comparação discutida anteriormente, o comparativo das estimativas feitas no presente estudo para potências do moinho, só que no de bolas.

Figura 6 – Estimativas de potência para moinho de bolas.



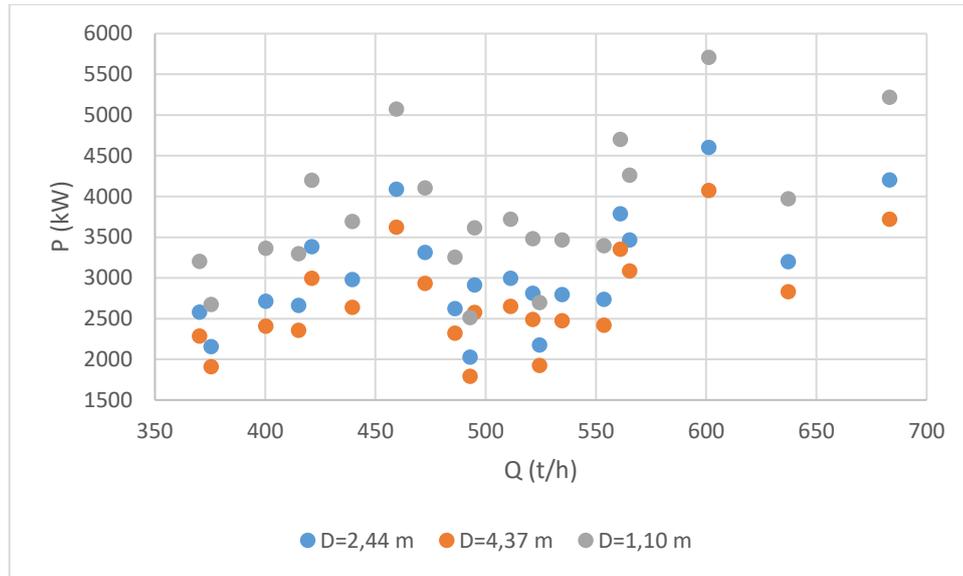
Fonte: A autora.

Visualizando o gráfico permite-se afirmar que as condições adotadas para esse estudo de caso e, conseqüentemente, a realização das estimativas de potências pelo método de Bond, não são satisfatórias para o moinho de bolas quando se deseja obter uma aproximação para a potência em relação à potência real do processo.

3.6 Avaliação do diâmetro em moinhos de barras

Comparou-se o desempenho de três moinhos de barras com diâmetros internos diferentes, plotando-se um gráfico de potência requerida pelo moinho pela capacidade do mesmo. O gráfico é mostrado na Figura 7.

Figura 7 – Potência requerida pela capacidade de processamento para moinhos de barras.



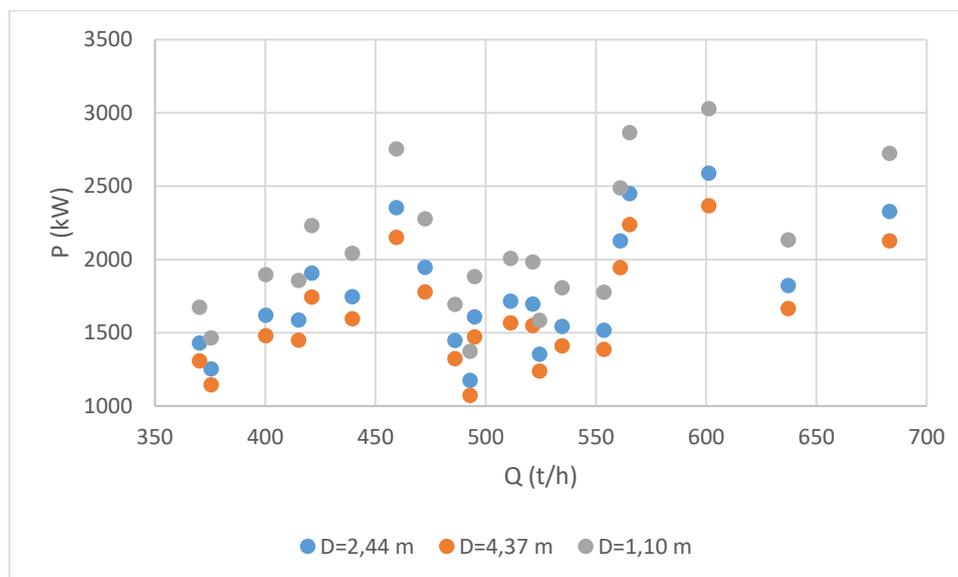
Fonte: A autora.

Visualizando o gráfico permite-se afirmar que diâmetros maiores tendem a melhorar a eficiência energética do moinho de barras, pois para o maior diâmetro, menor é a potência requerida. O menor diâmetro é o que apresenta uma maior potência requerida.

3.7 Avaliação do diâmetro em moinhos de bolas

Comparou-se o desempenho de três moinhos de bolas com diâmetros internos diferentes, plotando-se um gráfico de potência requerida pelo moinho pela capacidade do mesmo. O gráfico é mostrado na Figura 8.

Figura 8 – Potência requerida pela capacidade de processamento para moinhos de bolas.



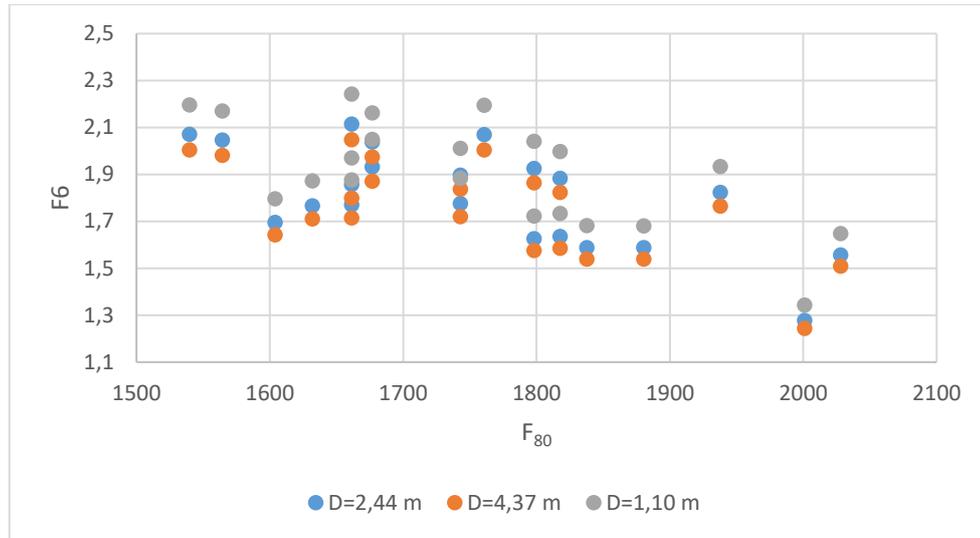
Fonte: A autora.

A análise visual do gráfico permite afirmar que, assim como no moinho de barras, que diâmetros maiores tendem a melhorar a eficiência energética do moinho de bolas, pois para o maior diâmetro, menor é a potência requerida. O menor diâmetro é o que apresenta uma maior potência requerida.

3.8 Influência do diâmetro interno do moinho de barras no F6

Um dos principais fatores de correção do método de Bond para moinhos de barras, é o fator de correção 6, o qual corrige a potência requerida pelo moinho através das taxas de redução do moinho. A taxa de redução está diretamente relacionada com o diâmetro interno de revestimento do moinho. Salientando que o comprimento das barras também influencia nesse fator, mas o comprimento das barras no moinho é relacionado com o diâmetro interno do mesmo. Com o objetivo de analisar a influência do diâmetro no fator de correção 6, plotou-se um gráfico de F6 por F80, para moinhos com diferentes diâmetros, o qual é exibido na Figura 9.

Figura 9 – F6 em função do F80 para moinhos de barras com diâmetros diferentes.



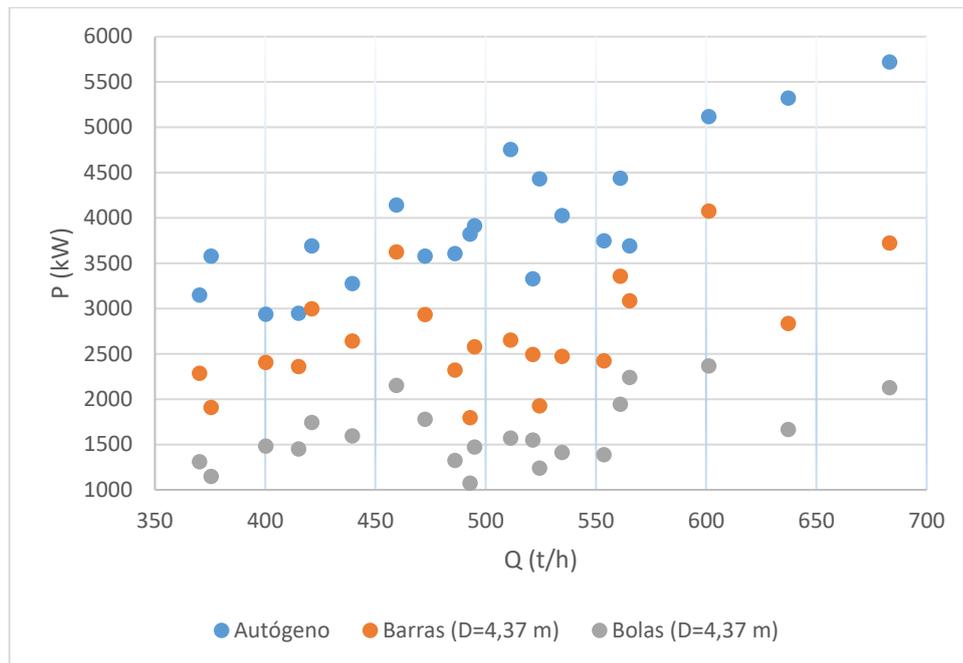
Fonte: A autora.

Analisando os dados obtidos e o gráfico, percebe-se claramente que outra variável também tem grande influência na determinação do fator F6, sendo, provavelmente, o P₈₀ de cada ponto experimental. Ainda assim, é possível visualizar o impacto da variação do diâmetro no valor do fator de correção, em que menores diâmetros geram fatores maiores e, conseqüentemente, uma maior potência requerida pelo moinho considerando o fator F6.

3.9 Desempenho dos moinhos analisados

Com o objetivo de substituir o moinho autógeno por um moinho de bolas ou barras com melhor desempenho energético, avaliou-se no presente trabalho algumas configurações utilizando o método de Bond. Estabeleceu-se a influência do diâmetro nas comparações anteriores e levando isso em consideração, selecionou-se os moinhos de bolas e barras com diâmetro de 4,37 m para uma comparação de desempenho com o moinho autógeno. Plotou-se um gráfico de potência requerida pela capacidade do moinho para três tipos de moinhos (autógeno, bolas e barras), o mesmo é apresentado na Figura 10.

Figura 10 – Potência requerida na moagem em função da vazão de minério para três tipos de moinhos.



Fonte: A autora.

Analisando o desempenho dos moinhos com base na Figura 10 pode-se afirmar que o moinho de bolas é o que requer menor potência em comparação aos outros dois moinhos, sendo o moinho autógeno o que mais demanda potência. Com isso, a eventual substituição do moinho autógeno pelo moinho de bolas com diâmetro de 4,37 m provocaria uma economia energética considerável em relação à potência requerida.

4 CONCLUSÃO

De uma forma geral, os resultados apontam que entre as alternativas apresentadas, o moinho autógeno estimado pelo método Minnovex modificado é a opção que mais se aproxima potência real, tendo erros baixíssimos comparado com as outras estimativas.

Também se constata que o método Bond é de grande valor para realizar as estimativas de potências dos moinhos, desde que as condições sejam perfeitamente estabelecidas, de modo a fazer uma avaliação acurada dos fatores de correção.

O aumento do diâmetro em moinhos de bolas e barras influencia diretamente na potência requerida, favorecendo a diminuição da mesma.

Conclui-se que o moinho autógeno pode ser substituído pelos moinhos de bolas e barras analisados no presente estudo, de modo a diminuir a potência requerida pelo moinho no processo de moagem.

REFERÊNCIAS

- BEHNAMFARD, A.; ROUDI, D. N.; VEGLIO, F.. The performance improvement of a full-scale autogenous mill by setting the feed ore properties. **Journal of Cleaner Production**, v. 271, p. 122554, 2020.
- BOND, F. C. Crushing and grinding calculations, Part II. **Br. Chem. Eng.**, v. 6, p. 543-548, 1961.
- FARIA, G. H. C.; TEIXEIRA, R. L. P.; SHITSUKA, R.; GOUVEIA, L. L. A. Potencial de atuação da engenharia nos rejeitos sólidos de mineração no Brasil **Revista de Casos e Consultoria**, v. 12, n. 1, e24041, 2021.
- GOMES, W. L.; DELBONI, H.; JATOBÁ, T. L. A.; EL HAJJ, T. M. Método para simulação de moagem em moinho de bolas. **HOLOS**, v. 3, p. 133-140, 2014.
- GUPTA, A.; YAN, D. S. **Mineral processing design and operations: an introduction**. Elsevier, 2016.
- LUZ, A. B.; SAMPAIO, J. A.; FRANÇA, S.C. A.. **Tratamento de minérios**. 5ª edição. CETEM, 2010. 963p.
- METSO. **Manual de britagem**. 6ª edição. Metso Minerals, 2005. 512p.
- OLIVEIRA, R. F. **Uma revisão dos princípios de funcionamento e métodos de dimensionamento de moinhos de bolas**. 2012. 60 f. Monografia (Especialização em Engenharia de Recursos Minerais) – Escola de Engenharia, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2012.
- WILLS, B. A.; NAPIER-MUNN, T.. **Mineral Processing Technology - An Introduction to the Practical Aspects of Ore Treatment and Mineral Recovery**. Burlington: Elsevier, 2006.