

COMPARAÇÃO DE DIFERENTES EQUIPAMENTOS NA LAVAGEM DE AREIA, DOLOMITA E QUARTZO *

Henry Shinji Jouti ¹
Mauricio Guimarães Bergerman ²
Arthur Pinto Chaves ²

Resumo

A lavagem mineral consiste em separar o constituinte grosso, que é o mineral de interesse do constituinte mais fino, que geralmente é a argila. Tal prática traz benefícios como o aumento da qualidade do minério e do rendimento das operações subsequentes. Em alguns casos a presença da argila chega até a inviabilizar o aproveitamento do minério, sendo assim, de extrema importância a sua eliminação. Neste trabalho foi analisada a eliminação dos finos presentes nos materiais de areia de construção civil, dolomita e quartzo de alta pureza, realizando-se os ensaios de lavagem por peneiramento a úmido, e atrieção por *scrubber* e *Hydro-Clean*. Os resultados obtidos mostraram-se eficientes na remoção dos finos, variando conforme cada material. Para a dolomita os três ensaios de lavagem mostraram-se eficientes na eliminação de finos. Já para a areia os ensaios com *scrubber* e o *Hydro-Clean* foram mais eficientes enquanto que no quartzo apenas o *Hydro-Clean*. Este equipamento mostrou-se bastante eficiente na eliminação de finos para os três materiais, porém causou a fragmentação das partículas, sendo de 40% na areia, 19,4% na dolomita e 35% no quartzo.

Palavras-chave: Lavagem Mineral; *Hydro-Clean*; Escrubagem;

COMPARISON OF DIFFERENT EQUIPMENT FOR WASHING SAND, DOLOMITE AND QUARTZ

Abstract

Mineral washing consists of separating the coarse constituent, which is the mineral of interest, from the finest constituent, which is usually clay. This practice brings benefits such as increasing the quality of the ore and the yield of subsequent operations. In some cases the presence of clay makes it impossible to use the ore, so it is extremely important to eliminate it. In this work, the fines present elimination in the materials of construction sand, dolomite and high purity quartz was analyzed, performing the tests of washing by wet sieving, and disaggregation by scrubber and *Hydro-Clean*. The results obtained showed to be efficient in removing the fines, varying according to each material. For dolomite the three washing tests proved to be efficient. For sand the scrubber and *Hydro-Clean* tests were more efficient while for quartz it was only the *Hydro-Clean*. This equipment proved to be very efficient for the three materials, but caused the fragmentation of particles with 40% in the sand, 19.4% in dolomite and 35% in quartz.

Keywords: Ore washing; *Hydro-Clean*; Scrubber.

¹ Eng. Metalúrgico, estudante, Departamento de Engenharia Metalúrgica e de Materiais, Escola Politécnica da USP, São Paulo, Brasil. E-mail: hsjouti@gmail.com

² Eng. De Minas, doutor, professor, Departamento de Engenharia de Minas e de Petróleo, Escola Politécnica da USP, São Paulo, Brasil. E-mail: mbergerman@gmail.com; apchaves@usp.br

1 INTRODUÇÃO

A lavagem mineral é um processo utilizado na mineração desde seus primórdios, sendo que as primeiras patentes de equipamentos de lavagem são do final do século XIX. Desde aquela época já se tinha a preocupação de eliminar as impurezas contidas nos minérios, um exemplo disso, foi Lockhart [1] que desenvolveu a sua patente no ano de 1893, com a finalidade de separar as gemas dos materiais argilosos e orgânicos. A operação de lavagem mineral tem como objetivo a remoção dessas impurezas, que geralmente são compostas por materiais argilosos ou argila e são encontrados na forma de finos agregados ou aderidos à superfície das partículas mais grosseiras [2]. A argila é composta predominantemente por silicatos de alumínio, podendo ser encontrados com ferro e outros elementos associados [3].

A presença de argila nos minérios é considerada indesejada por afetar o teor do minério, prejudicando a sua qualidade e assim, diminuindo o valor agregado do produto final [4,5]. No beneficiamento do minério de ferro, por exemplo, a presença de materiais lateríticos e partículas de argila são os responsáveis por diminuírem a qualidade do minério sendo assim, necessário removê-las [6]. Além disso, as argilas também são prejudiciais no rendimento dos processos subsequentes de beneficiamento, em certos casos chegam até mesmo a inviabilizá-los. Um exemplo disso, é o que ocorre no beneficiamento da bauxita, onde a presença do argilomineral caulinita é extremamente prejudicial ao processo, por ser uma impureza deletéria e reativa, ela impede a recuperação de gibbsita (mineral útil da bauxita), devido a formação de um produto insolúvel [7,8]. Ademais, a presença de argilominerais numa polpa aumenta a sua viscosidade, dificultando o desempenho dos processos de separação como densitários ou a flotação.

Um dos métodos mais comuns utilizados na remoção de finos é o processo de lavagem, que consiste na separação de dois constituintes de granulometria distintas, sendo que o material fino é geralmente um material argiloso. Um outro processo que ocorre simultaneamente à lavagem, é a escrubagem, que consiste em um processo de desagregação de minério, por meio da atrito das partículas entre si [2,9]. Na literatura, temos diversos equipamentos que são utilizados para tal finalidade e que, apresentam eficiências diferentes para cada tipo de material. A escolha mais adequada do equipamento a ser utilizada, depende de alguns parâmetros, tais como a granulometria das partículas e a plasticidade da argila presente no minério. Atualmente são utilizados na indústria desde equipamentos mais simples tais como o peneiramento seco e a úmido, até os mais complexos, com sistemas rotativos como o *scrubber*, ou com sistemas de atrito como *log-washer* ou então, com sistemas de alta pressão como o *Hydro-Clean* [10,11].

O *scrubber drum* é um dos equipamentos tradicionais mais utilizado na lavagem mineral, no qual apresenta como diferencial o processo de escrubagem, que ocorre com maior intensidade do que nos demais equipamentos. É utilizado em minérios com quantidade elevada de argila, que demandam maior desagregação para uma limpeza mais efetiva, sendo atualmente empregado na lavagem dos minérios de bauxita, ouro e cassiterita [12]. O funcionamento é simples, o material é inserido em um tambor levemente inclinado em relação à horizontal, que gira em torno do seu eixo, criando uma tensão de cisalhamento entre o material alimentado e o tambor. O atrito entre as superfícies das partículas, faz com que os aglomerados e argilas sejam desagregadas e a suas forças de ligação dissolvidas [13,14]. Após escrubagem, é realizado o peneiramento para a separação das partículas de

interesse, esta combinação de equipamentos é bastante efetiva na separação de impurezas [15,16].

O *Hydro-Clean* é uma tecnologia recente desenvolvida pela empresa Haver, com o diferencial de ser mais eficiente que os demais equipamentos, em termos de consumo de água e energia. É capaz de atender minérios que necessitam de altos níveis de limpidez e ainda assim, com a economia de 50% de água e 10% de energia em relação aos equipamentos tradicionais de lavagem [6]. O *Hydro-Clean* apresenta as seguintes características, é composto por um sistema de lavagem de alta pressão, com pressão máxima de 150 bar e tem capacidade de processamento de 320 t/h. Suas aplicações vão desde agregados para a indústria de construção civil, até minérios como gesso, calcário, ouro e diamante [17,11].

Neste trabalho foram estudados os seguintes materiais, a areia de construção civil, a dolomita e o quartzo de alta pureza. Embora, o termo areia seja considerado genérico, a norma NBR 7225 da ABNT, classifica a areia como um material puramente natural e com granulometria máxima de 2 mm. Com isso, para fins práticos adotou-se simplesmente como areia, o material que é encontrada em leito de rios, sendo utilizado na construção civil e como quartzo, o material de alta pureza utilizado em aplicações mais nobres, como na produção de ligas à base de silício. O objetivo do trabalho é avaliar a eficiência dos equipamentos de lavagem (peneiramento a úmido, *scrubber* e *Hydro-Clean*) por meio da eliminação dos finos presentes nesses materiais.

2 DESENVOLVIMENTO

O presente trabalho foi desenvolvido em 3 etapas. A primeira etapa consistiu no preparo da amostra, sendo realizada a secagem, a homogeneização e o quarteamento. Na segunda etapa, foram realizados os ensaios de lavagem (peneiramento a úmido, *scrubber* e *Hydro-Clean*) e o peneiramento a seco. Por fim, a última etapa consistiu na análise química das amostras obtidas nos ensaios.

2.1 Peneiramento

As análises granulométricas foram realizadas por peneiramento a seco para as amostras de base, no qual se utilizou um peneirador vibratório suspenso disponível no LTM (Laboratório de Tratamento de Minérios e Resíduos Industriais) com tempo de operação de 10 minutos, e para as amostras lavadas foi realizado o peneiramento a úmido de forma manual.

As malhas utilizadas para a areia foram 12,6, 6,30, 3,35, 1,70, 0,850, 0,425, 0,212, 0,106 mm. Já para a dolomita, foram adotadas as malhas de 6,30, 3,35, 1,70, 0,850, 0,425, 0,212, 0,106 mm. E para o quartzo adotaram-se as malhas de 19,0, 16,0, 9,50, 3,35, 1,18, 0,425, 0,106 mm.

2.2 Scrubber

O *scrubber* utilizado nos ensaios foi do tipo laboratorial, como podemos ver na figura 1, com as seguintes características, o jarro era de aço inoxidável, com as dimensões de 305 mm de comprimento e 195 mm de diâmetro, com capacidade volumétrica de 3,8 L. A polpa foi preparada com massa mínima de 50% de sólidos em peso de amostra, como as alíquotas apresentavam 500 mg foi utilizado 500 mL

de água. O jarro, então é preenchido com a polpa e fechado completamente, sendo submetido a rotação de 33,6 rpm por 10 minutos (35% da velocidade crítica).

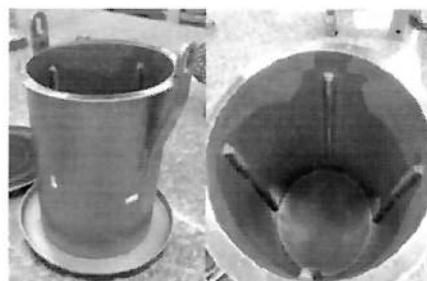


Figura 1. Scrubber laboratorial

2.2 Hydro-Clean

O *Hydro-Clean* utilizado nos ensaios foi o modelo laboratorial HC-200 representado na figura 2. O material a ser lavado é colocado na câmara de lavagem, após acionamento, o bico de alta pressão realiza a lavagem, com isso o material é separado por duas peneiras padrões de 0,8 e 2,0 mm de abertura, o *oversize* fica retido nessas peneiras enquanto que o *undersize* fica retido no coletor. A pressão adotada para os ensaios foi de 150 bar e o tempo de lavagem de 2 minutos.



Figura 2. *Hydro-Clean* 200-LAB (1-câmara de lavagem, 2-coletor do *undersize*, 3-bico de alta pressão, 4-peneiras, 5-botão de ligar/desligar, 6-timer, 7-medidor de pressão)

2.4 Análise Química

As composições químicas das amostras foram determinadas por espectrometria de fluorescência (FRX), realizadas no Laboratório de Caracterização Tecnológica (LCT) no Departamento de Engenharia de Minas e Petróleo da USP.

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1 Areia

Na figura 3, temos as curvas granulométricas da areia, referentes aos ensaios de peneiramento a seco e das lavagens realizadas.

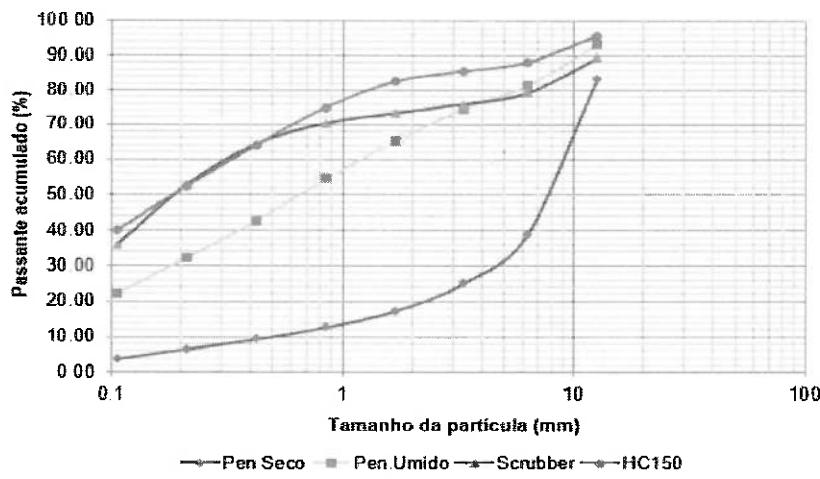


Figura 3. Curva granulométrica da Areia

Analizando a curva granulométrica do peneiramento a seco notou-se que o peneiramento a seco não foi eficiente, pois mais de 60% da areia ficaram retidas nas peneiras iniciais (12,6 e 6,3 mm), enquanto que nos ensaios de lavagem, observou-se uma melhor distribuição das suas partículas entre as malhas, onde mais de 60% da areia foi distribuída ao longo das peneiras. Essas diferenças são ocasionadas devido à presença de finos na areia, que se encontravam aderidos superficialmente às partículas e também na forma de torrões, como podemos observar na figura 5.

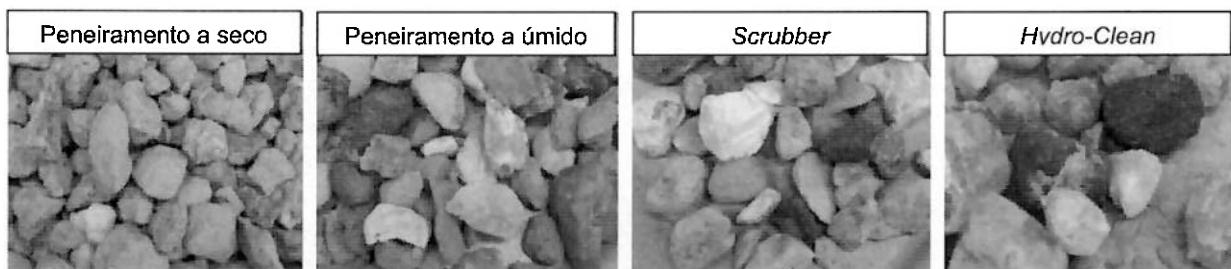


Figura 4. Fração -12,6 +6,30 mm de areia

Analizando as imagens acima observa-se que as partículas de areia ficaram mais limpas com os ensaios de lavagem, porém apresentando diferentes graus de limpeza. O peneiramento a úmido não foi capaz de eliminar os torrões, enquanto que no scrubber e no Hydro-Clean, foram desagregados já que não foram observados a presença deles, notando-se apenas resquícios de finos.

Analizando os finos de areia ($-106 \mu\text{m}$) obtidos nos ensaios, notou-se que a porcentagem de eliminação de finos no peneiramento a seco (3,86%) foi consideravelmente inferior que nos demais ensaios, que apresentaram eliminação superiores a 22%. Esta diferença, provavelmente, esteja associada não só à limpeza e a desagregação dos torrões, mas também devido à fragmentação das partículas. Portanto, foi necessário realizar a análise química dos finos obtidos antes e pós lavagens e assim quantificar a argila (Al_2O_3 e Fe_2O_3) presente nesses finos.

Os resultados da análise química e da recuperação da areia estão expressos na tabela 1-4. sendo correspondentes à fração de interesse ($+106 \mu\text{m}$) e à fração de finos ($-106 \mu\text{m}$).

Tabela 1. Resultados do peneiramento a seco (areia)

fração (μm)	massa (%)	teores (%)			distribuição (%)		
		SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃
+ 106,0	96,14	68,20	15,40	4,91	9,36	95,56	95,59
- 106,0	3,86	64,10	17,80	5,64	3,64	4,44	4,41
alim. cal.	100,0	68,04	15,49	4,94	100,0	100,0	100,0

Tabela 2. Resultados do peneiramento a úmido (areia)

fração (μm)	massa (%)	teores (%)			distribuição (%)		
		SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃
+ 106,0	77,94	70,60	13,50	4,96	80,79	70,14	73,00
- 106,0	22,06	59,30	20,30	6,48	19,21	29,86	27,00
alim. cal.	100,0	68,11	15,00	5,30	100,0	100,0	100,0

Tabela 3. Resultados do Scrubber (areia)

fração (μm)	massa (%)	teores (%)			distribuição (%)		
		SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃
+ 106,0	64,17	75,50	10,80	4,12	70,16	48,07	52,34
- 106,0	35,83	57,50	20,90	6,72	29,84	51,93	47,66
alim. cal.	100,0	69,05	14,42	5,05	100,0	100,0	100,0

Tabela 4. Resultados do Hydro-Clean (areia)

fração (μm)	massa (%)	teores (%)			distribuição (%)		
		SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃
+ 106,0	60,04	77,00	11,00	3,68	65,67	46,79	48,34
- 106,0	39,96	60,50	18,80	5,91	34,33	53,21	51,66
alim. cal.	100,0	70,41	14,12	4,57	100,0	100,0	100,0

Nota-se que a maior eliminação de Al₂O₃ nos finos, foi alcançada na lavagem com o *Hydro-Clean* (53,21%), sendo seguido do *scrubber* (51,93%) e do peneiramento a úmido (29,86%). Já em relação ao Fe₂O₃, nota-se que a maior eliminação (51,66%) também ocorreu no *Hydro-Clean*, sendo seguido do *scrubber* (47,66%) e do peneiramento a úmido (27%). Estes resultados mostram que o *Hydro-Clean* foi o equipamento mais eficiente na eliminação de argila entre os ensaios de lavagem, sendo seguido do *scrubber*, que apresentou um desempenho inferior ao *Hydro-Clean*, porém muito próximo, com diferença de menos de 2% e 4% de Al₂O₃ e Fe₂O₃, respectivamente. Porém, analisando a eliminação de SiO₂, nota-se que a quantidade eliminada no *Hydro-Clean* (34,33%) foi maior que no *scrubber* (29,84%), indicando que as partículas de quartzo foram fragmentadas na lavagem.

Observando a figura 5, notamos que a massa eliminada no *Hydro-Clean* (39,96%) foi consideravelmente maior que no peneiramento a seco, porém foi próxima do *scrubber* (35,83%). Porém o seu teor de SiO₂ (60,5%) diminuiu em relação ao peneiramento a seco (64,1%), o que nos mostra que a fragmentação das partículas no *Hydro-Clean* não foi expressiva.

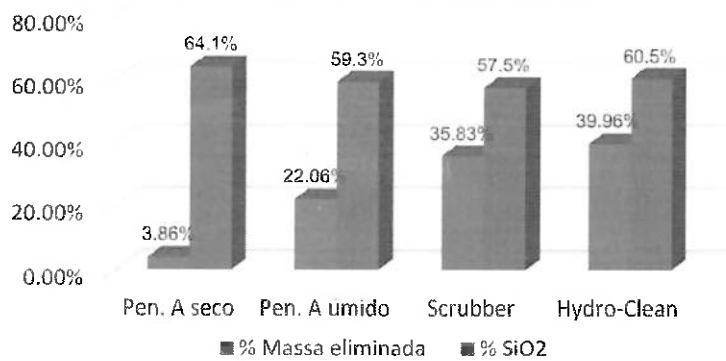


Figura 5. Comparativo entre o teor de SiO₂ e a massa eliminada (-106 µm)

3.2 Dolomita

Na Figura 6, temos as curvas granulométricas da dolomita, referentes aos ensaios de peneiramento a seco e das lavagens realizadas.

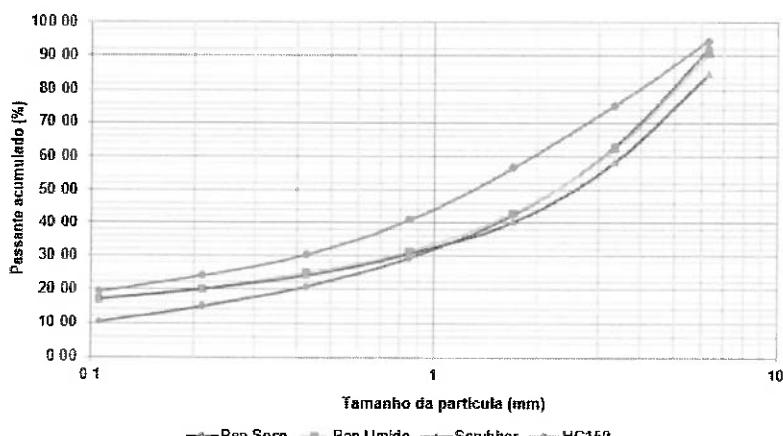


Figura 6. Curva granulométrica da Dolomita

Observa-se que os ensaios apresentaram a mesma tendência, com curvas muito semelhantes em alguns ensaios, como por exemplo, nos ensaios de lavagem no peneiramento a úmido e no scrubber. Nota-se que mesmo no peneiramento a seco, obteve-se uma boa distribuição do material entre as malhas, o que se repetiu nos demais ensaios. Na figura 7, temos um comparativo da dolomita referente a cada ensaio, observa-se que a dolomita é um material aparentemente limpo, apresentando os finos apenas aderidos à superfície. Fato é que, já no peneiramento a úmido, conseguimos observar uma boa limpeza em relação ao peneiramento a seco.



Figura 7. Fração -6,30 +3,35 mm de dolomita

Analisando as partículas de dolomita percebe-se que ficaram mais limpas com os ensaios de lavagem, apresentando diferentes graus de limpeza. A quantidade de finos de dolomita (-106 μm) obtidos nestes ensaios foram razoavelmente próximas, variando em torno de 18%, afim de quantificar a argila presente nesses finos e avaliar a eficiência de lavagem realizado a análise química antes e pós lavagem.

Os resultados da análise química e da recuperação da areia estão expressos na tabela 5-8. sendo correspondentes à fração de interesse (+106 μm) e à fração de finos indesejados (-106 μm).

fração (μm)	massa (%)	teores (%)					distribuição (%)				
		SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO
+ 106	89,55	9,28	1,26	0,33	27,00	19,80	82,65	73,62	75,87	91,36	89,60
- 106	10,45	16,7	3,87	0,90	21,90	19,70	17,35	26,38	24,13	8,64	10,40
alim. cal.	100,0	10,1	1,53	0,39	26,47	19,79	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0

Tabela 5. Resultados do peneiramento a seco (dolomita)

fração (μm)	massa (%)	teores (%)					distribuição (%)				
		SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO
+ 106	82,87	6,63	0,28	0,10	28,40	20,30	59,42	14,73	23,67	88,53	84,80
- 106	17,13	21,90	7,84	1,56	17,80	17,60	40,58	85,27	76,33	11,47	15,20
alim.cal.	100,0	9,25	1,58	0,35	26,58	19,84	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0

Tabela 6. Resultados do peneiramento a úmido (dolomita)

fração (μm)	massa (%)	teores (%)					distribuição (%)				
		SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO
+ 106	83,08	5,37	0,21	0,09	28,80	20,50	54,63	13,39	23,38	88,32	84,55
- 106	16,92	21,9	6,67	1,54	18,70	18,40	45,37	86,61	76,62	11,68	15,45
alim.cal.	100,0	8,17	1,30	0,34	27,09	20,14	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0

Tabela 7. Resultados do scrubber (dolomita)

fração (μm)	massa (%)	teores (%)					distribuição (%)				
		SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO
+ 106	80,62	6,67	0,23	0,05	28,80	20,40	57,86	13,93	12,20	86,08	82,02
- 106	19,38	20,20	5,91	1,35	19,40	18,60	42,14	86,07	87,80	13,94	17,98
alim.cal.	100,0	9,29	1,33	0,34	26,98	20,05	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0

Tabela 8. Resultados do Hydro-Clean (dolomita)

Nota-se que as eliminações de Al₂O₃ alcançadas nos finos, foram bem próximas, no scrubber (86,61%), Hydro-Clean (86,07%) e no peneiramento a úmido (85,27%). Já a eliminação de Fe₂O₃, foi maior no Hydro-Clean (87,80%), sendo seguida do scrubber (76,62%) e do peneiramento a úmido (76,33%). Estes resultados mostram que os três ensaios de lavagem apresentaram bons desempenhos na eliminação de argila, com eliminações de Al₂O₃ muito próximas, já em relação ao Fe₂O₃ o Hydro-Clean conseguiu eliminar 10% a mais que o scrubber. Percebe-se que o peneiramento a úmido, ainda que seja considerada uma técnica simples, mostrou-se eficiente na remoção da argila na dolomita. Nota-se que o Hydro-Clean eliminou 2% a mais de CaO e MgO que os demais ensaios, porém em relação ao SiO₂ (42,14%) a eliminação foi pouco superior que no peneiramento a úmido (40,58%), mas inferior ao scrubber (45,37). Na figura 8, podemos ver que o teor de SiO₂ aumentou de 16,7% para 20,2%, comparando o Hydro-Clean com o peneiramento a seco, enquanto que o teor de CaO+MgO reduziu de 41,6% para

38,0%, indicando que ocorreu fragmentação mais significativa das partículas de SiO₂.

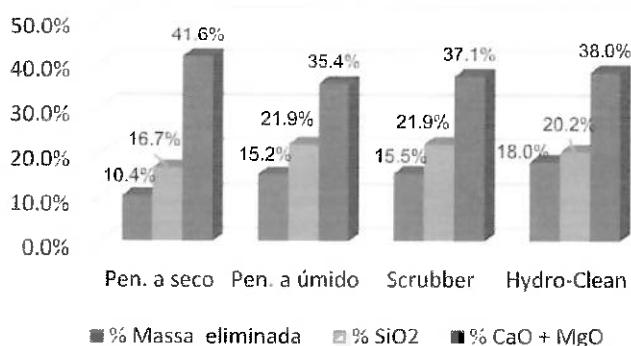


Figura 8. Comparativo entre os teores de CaO+MgO e SiO₂ (-106 µm)

3.3 Quartzo

A curva granulométrica do quartzo é apresentada na figura 9, podemos observar que os ensaios apresentaram a mesma tendência, com destaque para o *Hydro-Clean* que apresentou uma melhor distribuição de suas partículas entre as malhas.

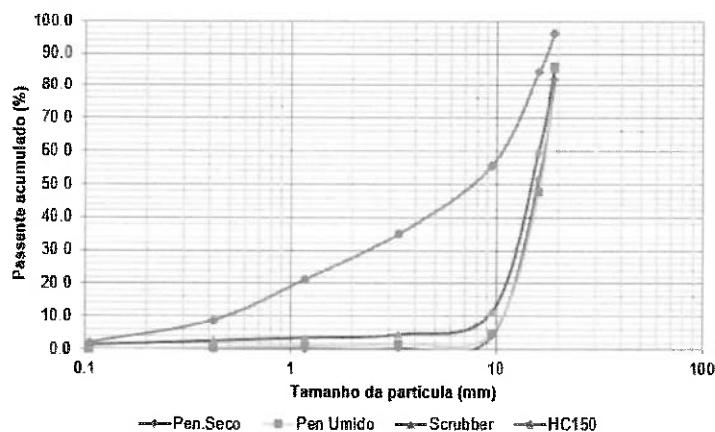


Figura 9. Curva granulométrica do Quartzo

O peneiramento dos demais ensaios não foi eficiente, pois cerca de 90% das partículas ficaram retidas nas peneiras iniciais (19, 16 e 9,5 mm), diferentemente do *Hydro-Clean*. Apesar desta diferença, a massa de finos (-106 µm) obtida, em porcentagem foi praticamente a mesma em todos os ensaios, ficando em torno de 1%. Isso significa que caso tenha ocorrido a fragmentação das partículas, provavelmente elas ficaram distribuídas entre as malhas, de modo que não seja notado nos finos. Na figura 9, temos um comparativo dos ensaios do quartzo, notase visualmente que se trata de um material bastante limpo, apresentando finos aderidos superficialmente.

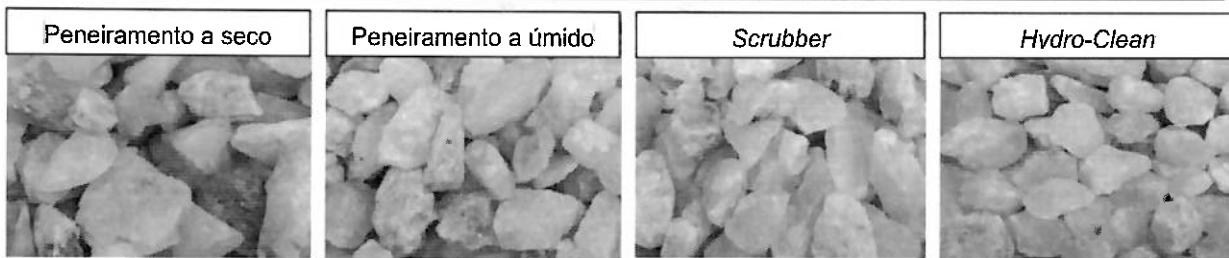


Figura 10. Fração -16,0 +9,50 mm de quartzo

Analizando as imagens acima observa-se que as partículas de quartzo ficaram mais limpas através dos ensaios de lavagem, porém apresentando diferentes graus de limpeza. Pois no peneiramento a seco observa-se que as partículas apresentaram coloração marrom clara, enquanto que no scrubber e no *Hydro-Clean*, as partículas apresentaram coloração branca, indicando que a limpeza foi superior. Para analisar a eficiência de limpeza obtida nos ensaios, foi necessário realizar a análise química de antes e pós lavagens, e assim quantificar a argila (Al_2O_3 e Fe_2O_3) presente no quartzo.

Os resultados da análise química referentes aos ensaios de lavagem do quartzo estão expressos na tabela 9-12. Foi adotada como granulometria de corte a fração 3,35 mm, a fim de comparar tais resultados com a especificação utilizada pela empresa RIMA.

fração (mm)	massa (%)	teores (%)			distribuição (%)		
		SiO_2	Al_2O_3	Fe_2O_3	SiO_2	Al_2O_3	Fe_2O_3
+3,35	99,77	97,70	0,19	1,23	99,78	98,89	99,40
-3,35	0,23	93,40	0,94	3,24	0,22	1,11	0,60
alim. cal.	100,0	97,69	0,19	1,23	100,0	100,0	100,0

Tabela 9. Resultados do peneiramento a seco (quartzo)

fração (mm)	massa (%)	teores (%)			distribuição (%)		
		SiO_2	Al_2O_3	Fe_2O_3	SiO_2	Al_2O_3	Fe_2O_3
+3,35	98,31	99,10	0,12	0,31	98,38	86,74	92,86
-3,35	1,69	95,30	1,07	1,39	1,62	13,26	7,14
alim. cal.	100,0	98,04	0,14	0,33	100,0	100,0	100,0

Tabela 10. Resultados do peneiramento a úmido (quartzo)

fração (mm)	massa (%)	teores (%)			distribuição (%)		
		SiO_2	Al_2O_3	Fe_2O_3	SiO_2	Al_2O_3	Fe_2O_3
+3,35	95,62	97,10	0,12	1,33	95,79	63,31	92,64
-3,35	4,38	93,30	1,52	2,31	4,21	36,69	7,36
alim. cal.	100,0	96,93	0,18	1,37	100,0	100,0	100,0

Tabela 11. Resultados do scrubber (quartzo)

fração (mm)	massa (%)	teores (%)			distribuição (%)		
		SiO_2	Al_2O_3	Fe_2O_3	SiO_2	Al_2O_3	Fe_2O_3
+3,35	65,10	98,50	0,10	0,05	65,43	24,34	15,72
-3,35	34,90	97,10	0,58	0,50	34,57	75,66	84,28
alim. cal.	100,0	98,01	0,27	0,21	100,0	100,0	100,0

Tabela 12. Resultados do *Hydro-Clean* (quartzo)

A especificação do quartzo aproveitado pela empresa RIMA apresenta granulometria acima de 6,35 mm, com teores máximos de 0,17% para Al_2O_3 e 0,78% para Fe_2O_3 . Infelizmente, não foi possível adotar essa mesma granulometria,

porém escolheu-se a granulometria mais próxima possível que a contemplasse. Analisando os dados obtidos na fração retida (+3,35 mm), notou-se que os ensaios que atenderam tais especificações foram o peneiramento a úmido (0,12% e 0,31%) e o *Hydro-Clean* (0,10% e 0,05%). Observou-se ainda que o teor de Fe₂O₃ obtido no *scrubber* aumentou em relação ao peneiramento a seco, o que não é esperado, provavelmente, seja devido à alta variabilidade da amostra, em que ao se realizar o quarteamento, a presença de um grão foi capaz distorcer seu teor.

Analizando os resultados obtidos na fração passante (-3,35 mm), notou-se que a melhor eliminação de Al₂O₃ foi alcançada na lavagem com o *Hydro-Clean* (75,66%), sendo seguida do *scrubber* (36,69%) e do peneiramento a úmido (13,26%). Já em relação ao Fe₂O₃, nota-se que a melhor eliminação (84,23%) também ocorreu no *Hydro-Clean*, sendo seguida do *scrubber* (7,36%) e do peneiramento a úmido (7,14%). Esses resultados mostram que o *Hydro-Clean* foi o equipamento mais eficiente na eliminação de argila entre os ensaios de lavagem, eliminando mais que o dobro de Al₂O₃ e onze vezes mais Fe₂O₃ que o *scrubber*. Porém, analisando a eliminação de SiO₂ no *Hydro-clean*, nota-se que sua quantidade eliminada foi bem significante (34,57%) em relação ao *scrubber* (4,21%) e peneiramento a úmido (1,62%), indicando que as partículas de quartzo foram fragmentadas na lavagem. Observando o gráfico da figura 11, notamos que a massa eliminada no *Hydro-Clean* foi expressiva (34,90%), além disso o seu teor de SiO₂ também foi maior (97,1%) que nos demais ensaios, o que nos mostra que a ótima eficiência de limpeza do quartzo obtida no *Hydro-Clean* foi acompanhada da fragmentação das suas partículas.

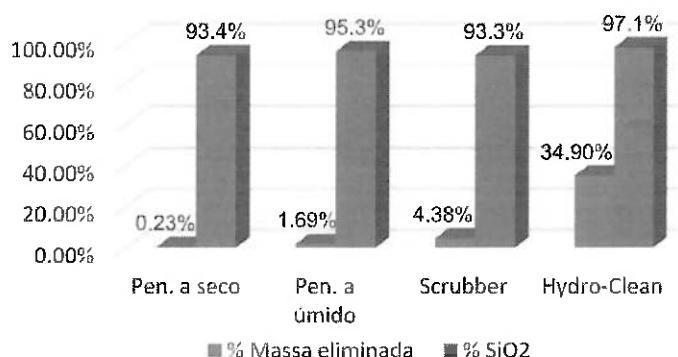


Figura 11. Comparativo entre o teor de SiO₂ e a massa eliminada (-3,35 mm)

3 CONCLUSÃO

Neste trabalho foram analisados diferentes equipamentos de lavagem, os quais apresentaram diferenças significativas em relação à eliminação de finos e fragmentação. Os resultados da lavagem da areia mostraram que o *Hydro-Clean* foi o equipamento mais eficiente na remoção de argila, eliminando 53,21% de Al₂O₃ e 51,66% de Fe₂O₃, além disso a fragmentação das partículas não foi significativa. Os resultados da lavagem da dolomita mostraram que o *Hydro-Clean* foi o mais eficiente na eliminação de finos, com 86,07% de Al₂O₃ e 87,80% de Fe₂O₃, porém nota-se que o *scrubber* também apresentou bom desempenho com 86,61% de Al₂O₃ e 76,62% de Fe₂O₃. Os resultados da lavagem do quartzo mostraram que o *Hydro-Clean* foi o equipamento mais eficiente na remoção de argila, eliminando 75,66% de Al₂O₃ e 84,28% de Fe₂O₃, além disso conseguiu atender a especificação da

empresa RIMA. É importante de se ressaltar que essa boa eficiência de limpeza obtida foi acompanhada da fragmentação de suas partículas.

Agradecimentos

Agradeço ao Departamento de Engenharia de Minas e de Petróleo da Escola Politécnica da USP, ao Laboratório de Tratamento de Minérios e Resíduos Industriais (LTM) por permitir o uso dos seus equipamentos e disponibilizar todos os insumos necessários e também aos técnicos Dora e Fernando. E por fim, às empresas mineradoras RIMA e JUNDU, que forneceram as amostras para o presente trabalho.

REFERÊNCIAS

- 1 Lockhart WS, inventor; Art of washing and separating minerals No. 509,818. 1893 Nov 28. [acesso em 25 mai de 2020]
- 2 Trajano R, Princípios de tratamento de minérios: operações unitárias e aparelhos. Rio de Janeiro, 1966. p. 62-63
- 3 Weems JB. Chemistry of clays. 1903 [acesso em 19 ago. 2020] Disponível em: <https://ir.uioawa.edu/cgi/viewcontent.cgi?article=1076&context=igasar>
- 4 Chaves AP. Teoria e prática do tratamento de minérios. 2^a ed. São Paulo: Signus Editora, 2002, 267 p. v.1
- 5 Young CA, Kawatra KS, Dunne RC. SME Mineral processing & extractive metallurgy handbook, v.1, Colorado, Ed. Society for Mining, Metallurgy & Exploration, 2019
- 6 Silge S, Zlatev, M, Iron Ore Washing – Achieve more with fewer resources, Iron ore Conference/Perth, WA, 13–15 July 2015
- 7 Chaves, A P, Gancev, R K, Massola, C P and Andrade, C F, 2009. Gibbsite Concentration from Bauxite Tailings Via Froth Flotation, Paper Presented in Flotation Seminar'09, 2009
- 8 Ahmad I, Ernst-Ulrich H, Werther, J, Wischnewski, R, Bauxite washing for the removal of clay October International Journal of Minerals Metallurgy and Materials, 2014
- 9 Costa JHB. Modelagem matemática da operação de escrubagem da bauxita de Paragominas – PA, São Paulo: Escola Politécnica da Universidade de São Paulo; 2010
- 10 Bedekovic, G, Vrkljan D, A Comparison between a Stationary and a Semi-Mobile Plant for Wet Processing of Crushed Stone, University of Zagreb, Faculty of Mining, Geology and Petroleum Engineering [acesso em 15 jun 2020].
- 11 Lagowsky, J, Saramak, D, Improving gravel and crushed aggregates washing technology efficiency through application of high pressure washer, E3S Web of Conferences 8, 2016
- 12 Grotjohann P, Müller H, Innovative and resource-preserving washing processes for primary and secondary raw materials, [in] XXV International Minerals Processing Congress (IMPC), Brisbane, 2010, p. 3441.
- 13 Taggart AF. Handbook of mineral dressing. New York, USA: John Wiley & Sons, 1945. v.1, 1-16 p.
- 14 Palombo S, Varella J, High pressure washing technology Hydro-Clean - Tailing and Mine Waste 08, Taylor & Francis Group, London.
- 15 Parker, P. High Silica Bauxite Processing, Economic Processing of High Silica Bauxites – Existing and potential processes, Peter Smith Parker Centre. CSIRO Light Metals Flagship. 2008:10 – 11
- 16 Husaini, H, Cahyono, S, Upgrading of Indonesia's bauxite by washing method, XXV International Mineral Processing Congress Proceedings/Brisbane, QLD, Australia, 2010
- 17 Ulsen C, Kahn, H, Antoniassi J, Masini, E. Removal of mica from crushed sand by high pressure washing. ResearchGate. 2014. [acesso em 05 mar 2020]. Disponível em:<https://www.researchgate.net/publication/289313552>.