

UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
ESCOLA POLITÉCNICA

HENRY SHINJI JOUTI

Comparação de diferentes equipamentos na lavagem de areia, dolomita e quartzo

São Paulo
2019

HENRY SHINJI JOUTI

Comparação de diferentes equipamentos na lavagem de areia, dolomita e quartzo

São Paulo

2019

HENRY SHINJI JOUTI

Comparação de diferentes equipamentos na lavagem de areia, dolomita e quartzo

Trabalho de Formatura apresentado à
Escola Politécnica da Universidade São Paulo

Departamento de Engenharia Metalúrgica e de
Materiais

Orientador: Prof. Dr. Maurício Guimarães
Bergerman

São Paulo

2019

Autorizo a reprodução e divulgação total ou parcial deste trabalho, por qualquer meio convencional ou eletrônico, para fins de estudo e pesquisa, desde que citada a fonte.

Jouti, Henry

Comparação de diferentes equipamentos na lavagem de areia, dolomita e quartzo / H. Jouti – São Paulo, 2019.

81 p.

Trabalho de Formatura – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo.
Escola Politécnica. Departamento de Engenharia Metalúrgica e de Materiais.

1.Lavagem mineral 2.*Hydro-Clean* 3.Areia 4.Dolomita 5.Quartzo Universidade de São Paulo. Escola Politécnica. Departamento de Engenharia Metalúrgica e de Materiais

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente aos meus pais, Ayrton e Ayako, ao meu irmão, Eric e à minha avó, Luzia, por todo apoio incondicional e incentivo, por não me deixar abatido mesmo com as dificuldades.

Agradeço ao Prof. Dr. Maurício Guimarães Bergerman por ter me orientado e guiado durante o todo o trabalho de maneira que sem ele, nada disso teria sido possível. Agradeço também, aos professores que aceitaram participar da minha banca e prestigiar esse trabalho, Prof. Dr. Arthur Pinto Chaves e Prof. Dr. Guilherme Frederico Bernardo Lenz e Silva.

Agradeço também as empresas do Grupo Rima, Mineração Jundu e Valpa – Mineração e Terraplanagem pelo fornecimento sem custos das amostras. E também, ao representante de vendas da empresa HAVER & BOECKER, Denilson Moreno pela ajuda com informações técnicas sobre o *Hydro-Clean*.

Agradeço também o LTM (Laboratório de Tratamento de Minério) e o LCT (Laboratório de Caracterização Tecnológica) do Departamento de Engenharia de Minas e Petróleo da EPUSP, por terem disponibilizado o uso dos equipamentos e pelas análises químicas, respectivamente. E também aos técnicos, Maria Auxiliadora da Silva Marzo e Fernando, por terem ajudado na parte experimental do trabalho.

Um agradecimento especial à Mariane Yuka Tsubaki Oide, pelo carinho, amizade e companheirismo. Por estar ao meu lado em todos os momentos, seja me dando bronca, conselhos ou até mesmo corrigindo minhas vírgulas. Saiba que sou eternamente grato por tê-la presente em minha vida, conte comigo sempre.

Agradeço também ao Departamento de Engenharia Metalúrgica e de Materiais da Escola Politécnica da USP, e aos meus amigos por me incentivarem e ajudarem ao longo dessa caminhada, em especial André William Menezes, Kon Bin Chong e Debora Teng.

RESUMO

JOUTI, H. **Comparação de diferentes equipamentos na lavagem de areia, dolomita e quartzo.** 2019. 81f. Trabalho de formatura – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2019.

A operação de lavagem é considerada uma das primeiras etapas do beneficiamento de minérios, principalmente quando a presença de finos agregados são indesejáveis. A remoção dos finos por meio da lavagem pode ser realizada em diversos equipamentos, dentre os quais podemos citar: o peneiramento, célula de atrição, *log washer*, lavadores de rosca, classificador em espiral, *scrubber*, *blade mill* e o *Hydro-Clean*. O *Hydro-Clean* é um dos equipamentos mais recentes no mercado, de acordo com o seu fabricante este apresenta uma maior eficiência na lavagem mineral e no consumo de água e com o consumo de energia compatível com os equipamentos tradicionais. Este trabalho teve como objetivo estudar a eficiência da lavagem do equipamento *Hydro-Clean* em comparação com o peneiramento a úmido e o *scrubber*. Em uma primeira etapa, foram realizados a amostragem do material e ensaios para determinação da granulometria inicial para cada material, para isto realizou-se homogeneização, quarteamento e o peneiramento a seco. Em um segundo momento, foram realizados diversos ensaios de lavagem, tais como peneiramento a úmido, *scrubber* e *Hydro-Clean*, seguida do ensaio de peneiramento a úmido para estes dois últimos, para determinação da granulometria pós-lavagem. Em um terceiro momento, foi realizado a preparação das amostras para análise química, afim de se verificar o quanto de finos foram liberados. Os resultados dos ensaios determinaram que os equipamentos *scrubber* e *Hydro-Clean* obtiveram desempenho superior aos demais na remoção dos finos, porém sendo ocorrendo a fragmentação das partículas.

ABSTRACT

JOUTI, H. **Comparação de diferentes equipamentos na lavagem de areia, dolomita e quartzo.** 2019. 81f. Trabalho de formatura – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2019.

The washing operation is considered one of the first steps in ore processing, especially when the presence of fine aggregates is undesirable. The removal of the fines by washing can be performed in several equipments, among which we can mention: sieving, attrition cell, log washer, screw washers, spiral classifier, scrubber, blade mill and Hydro-Clean. The Hydro-Clean is one of the most recent equipment on the market, according to its manufacturer it presents a greater efficiency in mineral washing and water consumption and energy consumption compatible with traditional equipment. The aim of this work was to study the efficiency of the Hydro-Clean equipment compared to wet sieving and scrubber. In a first stage, material sampling and tests to determine the initial granulometry for each material were carried out, for this purpose homogenization, quarrying and dry sieving were performed. In a second step, several washing tests were performed, such as wet sieving, scrubber and Hydro-Clean, followed by the wet sieving test for the latter two, to determine the post-wash grain size. In a third step, the samples were prepared for chemical analysis in order to check how much fines were released. The results of the tests determined that the scrubber and Hydro-Clean equipment performed better than the others in the removal of the fines, but the fragmentation of the particles occurred.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1: Desenho esquemático da máquina de atrição.....	05
Figura 2: Vista geral do equipamento <i>log washer</i>	06
Figura 3: Desenho esquemático do equipamento <i>log washer</i>	07
Figura 4: Vista geral do equipamento classificador espiral.....	08
Figura 5: Desenho esquemático do classificador espiral.....	08
Figura 6: Vista geral do equipamento lavador de rosca.....	09
Figura 7: Vista geral do equipamento <i>drum scrubber</i>	10
Figura 8 Vista interna do equipamento <i>blade mill</i>	11
Figura 9: Vista geral do equipamento <i>Hydro-Clean</i>	11
Figura 10: Desenho esquemático do equipamento <i>Hydro-Clean</i>	13
Figura 11: Fluxograma geral das atividades.....	17
Figura 12: Vista geral do jarro em inox (<i>scrubber</i>)	19
Figura 13: Vista geral do equipamento HC 200 – LAB (Haver)	20
Figura 14: Fração +12,6 mm de areia.....	51
Figura 15: Fração -12,6 +6,30 mm de areia.....	51
Figura 16: Fração -6,30 +3,35 mm de areia.....	52
Figura 17: Fração -3,35 +1,70 mm de areia.....	52
Figura 18: Fração -1,70 +0,85 mm de areia.....	53
Figura 19: Fração -0,850 +0,425 mm de areia.....	53
Figura 20: Fração -0,425 +0,212 mm de areia.....	54
Figura 21: Fração -0,212 +0,106 mm de areia.....	54
Figura 22: Fração -0,106 mm de areia.....	55

Figura 23: Fração +6,30 mm de dolomita.....	56
Figura 24: Fração -6,30 +3,35 mm de dolomita.....	56
Figura 25: Fração -3,35 +1,70 mm de dolomita.....	57
Figura 26: Fração -1,70 +0,85 mm de dolomita.....	57
Figura 27: Fração -0,850 +0,425 mm de dolomita.....	58
Figura 28: Fração -0,425 +0,212 mm de dolomita.....	58
Figura 29: Fração -0,212 +0,106 mm de dolomita.....	59
Figura 30: Fração -0,106 mm de dolomita.....	59
Figura 31: Fração +19,0 mm de quartzo.....	60
Figura 32: Fração -19,0 +16,0 mm de quartzo.....	60
Figura 33: Fração -16,0 +9,50 mm de quartzo.....	61
Figura 34: Fração -9,50 +3,35 mm de quartzo.....	61
Figura 35: Fração -3,35 +1,18 mm de quartzo.....	62
Figura 36: Fração -1,180 +0,425 mm de quartzo.....	62
Figura 37: Fração -0,425 +0,106 mm de quartzo.....	63
Figura 38: Fração -0,106 mm de quartzo.....	63

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1: Curva granulométrica da areia referente a cada ensaio.....	22
Gráfico 2: Curva granulométrica da dolomita referente a cada ensaio.....	25
Gráfico 3: Teor de SiO ₂ na dolomita (+0,106 mm).....	27
Gráfico 4: Teor de SiO ₂ na dolomita (-0,106 mm).....	27
Gráfico 5: Teor de Al ₂ O ₃ na dolomita (+0,106 mm).....	27
Gráfico 6: Teor de Al ₂ O ₃ na dolomita (-0,106 mm).....	27
Gráfico 7: Teor de Fe ₂ O ₃ na dolomita (+0,106 mm).....	27
Gráfico 8: Teor de Fe ₂ O ₃ na dolomita (-0,106 mm).....	27
Gráfico 9: Curva granulométrica de quartzo referente a cada ensaio.....	30
Gráfico 10: Teor de SiO ₂ no quartzo (+3,35 mm).....	31
Gráfico 11: Teor de SiO ₂ no quartzo (-3,35 mm).....	31
Gráfico 12: Teor de Al ₂ O ₃ no quartzo (+3,35 mm).....	31
Gráfico 13: Teor de Al ₂ O ₃ no quartzo (-3,35 mm).....	31
Gráfico 14: Teor de Fe ₂ O ₃ no quartzo (+3,35 mm).....	32
Gráfico 15: Teor de Fe ₂ O ₃ no quartzo (-3,35 mm).....	32
Gráfico 16: Curva granulométrica da areia (completo).....	49
Gráfico 17: Curva granulométrica da dolomita (completo).....	49
Gráfico 18: Curva granulométrica da quartzo (completo).....	50

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Comparação de parâmetros entre os sistemas de lavagens.....	13
Tabela 2: Comparação de parâmetros entre os sistemas de lavagens para uma mesma capacidade.....	14
Tabela 3: Resultado do ensaio de peneiramento a seco para areia.....	23
Tabela 4: Resultado do ensaio de lavagem por peneiramento a úmido para areia.....	23
Tabela 5: Resultado do ensaio de lavagem no <i>scrubber</i> para areia.....	23
Tabela 6: Resultado do ensaio de lavagem no <i>Hydro-Clean</i> 150 bar para areia.....	23
Tabela 7: Desempenho dos ensaios para a dolomita.....	24
Tabela 8: Resultado do ensaio de peneiramento a seco para a dolomita.....	26
Tabela 9: Resultado do ensaio de lavagem de peneiramento a úmido para a dolomita.....	26
Tabela 10: Resultado do ensaio de lavagem no <i>scrubber</i> para a dolomita.....	26
Tabela 11: Resultado do ensaio de lavagem no <i>Hydro-Clean</i> 150 bar para a dolomita.....	26
Tabela 12: Desempenho dos ensaios para a dolomita.....	28
Tabela 13: Resultado do ensaio de peneiramento a seco para o quartzo.....	30
Tabela 14: Resultado do ensaio de lavagem no <i>scrubber</i> para o quartzo.....	30
Tabela 15: Resultado do ensaio de lavagem no <i>Hydro-Clean</i> 150 bar para o quartzo.....	31
Tabela 16: Desempenho dos ensaios para o quartzo.....	32
Tabela 17: Especificação do teor de Al_2O_3 e Fe_2O_3 da empresa RIMA.....	32
Tabela 18: Análise granulométrica da areia após o ensaio de peneiramento a seco.....	39

Tabela 19: Análise granulométrica da areia após o ensaio de lavagem por peneiramento a úmido.....	39
Tabela 20: Análise granulométrica da areia após o ensaio de lavagem com <i>scrubber</i>	40
Tabela 21: Análise granulométrica da areia após o ensaio de lavagem com <i>Hydro-Clean</i> 50 bar.....	40
Tabela 22: Análise granulométrica da areia após o ensaio de lavagem com <i>Hydro-Clean</i> 105 bar.....	41
Tabela 23: Análise granulométrica da areia após o ensaio de lavagem com <i>Hydro-Clean</i> 150 bar.....	41
Tabela 24: Análise granulométrica da dolomita após o ensaio de lavagem por peneiramento a seco.....	42
Tabela 25: Análise granulométrica da dolomita após o ensaio de lavagem por peneiramento a úmido.....	42
Tabela 26: Análise granulométrica da dolomita após o ensaio de lavagem com <i>scrubber</i>	43
Tabela 27: Análise granulométrica da dolomita após o ensaio de lavagem com <i>Hydro-Clean</i> 50 bar.....	43
Tabela 28: Análise granulométrica da dolomita após o ensaio de lavagem com <i>Hydro-Clean</i> 105 bar.....	44
Tabela 29: Análise granulométrica da dolomita após o ensaio de lavagem com <i>Hydro-Clean</i> 150 bar.....	44
Tabela 30: Análise granulométrica do quartzo após o ensaio de peneiramento a seco.....	45
Tabela 31: Análise granulométrica do quartzo após o ensaio de lavagem por peneiramento a úmido.....	45
Tabela 32: Análise granulométrica do quartzo após o ensaio de lavagem com <i>scrubber</i>	46
Tabela 33: Análise granulométrica do quartzo após o ensaio de lavagem com <i>Hydro-Clean</i> 50 bar.....	46
Tabela 34: Análise granulométrica do quartzo após o ensaio de lavagem com <i>Hydro-Clean</i> 105 bar.....	47

Tabela 35: Análise granulométrica do quartzo após o ensaio de lavagem com *Hydro-Clean* 150 bar.....47

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO.....	1
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	3
2.1 BENFICIAMENTO.....	3
2.2 LAVAGEM DE MINÉRIOS.....	4
2.3 MÁQUINA DE ATRIÇÃO.....	5
2.4 <i>LOG WASHER</i>	6
2.5 CLASSIFICADOR ESPIRAL.....	7
2.6 LAVADOR DE ROSCA.....	8
2.7 <i>DRUM DCRUBBER</i>	9
2.8 <i>BLADE MILL</i>	10
2.9 <i>HYDRO-CLEAN</i>	11
2.10 ESTUDO DE CASO.....	14
2.10.1 AREIA.....	14
2.10.2 DOLOMITA.....	15
2.10.3 QUARTZO.....	15
3. MATERIAIS E MÉTODOS.....	17
3.1 AMOSTRAGEM E PREPARAÇÃO.....	17
3.2 PENEIRAMENTO A SECO.....	18
3.3 PENEIRAMENTO A ÚMIDO.....	18
3.4 ENSAIO DE LAVAGEM NO SCRUBBER.....	18
3.5 ENSAIO DE LAVAGEM NO <i>HYDRO-CLEAN</i>	19
3.6 ANÁLISE QUÍMICA.....	20
4. RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	21
4.1 AREIA.....	21

4.1.1 ANÁLISE GRANULOMÉTRICA.....	22
4.1.2 ANÁLISE QUÍMICA	23
4.2 DOLOMITA.....	24
4.2.1 ANÁLISE GRANULOMÉTRICA.....	25
4.2.2 ANÁLISE QUÍMICA.....	26
4.3 QUARTZO.....	28
4.3.1 ANÁLISE GRANULOMÉTRICA	29
4.3.2 ANÁLISE QUÍMICA	30
5. CONCLUSÕES.....	35
REFERÊNCIAS.....	37
APÊNDICE A – Tabelas com a granulometria das amostras.....	39
APÊNDICE B – Gráficos das análises granulométricas.....	49
APÊNDICE C – Imagens das amostras por frações.....	51
APÊNDICE D – Balanço metalúrgico e de massa.....	65
ANEXO – Análise Química.....	77

1. INTRODUÇÃO

Cada vez mais as indústrias buscam por soluções inovadoras afim de impulsionarem sua produtividade, de modo a continuarem competitivas no mercado, mas sem esquecer do compromisso com a preservação e conservação do meio ambiente. Na mineração isto não é diferente, a demanda não é apenas por tecnologias mais eficientes, mas também por soluções capazes de reduzir os impactos ao seu redor, seja no âmbito social, econômico e/ou ambiental.

Nesse contexto, temos o consumo de bens tais como a água e a energia, que no setor da mineração é extremamente dependente, tratam-se de recursos importantes para qualquer indústria. Muitos esforços e investimentos estão sendo realizados no setor afim de promover o seu uso consciente e ainda, buscar soluções e alternativas mais eficientes, capazes de obterem um melhor aproveitamento desses recursos.

Um exemplo do uso da água e energia na mineração é no processo de lavagem mineral, considerada uma operação unitária fundamental para materiais que necessitam da eliminação de partículas finas. Neste trabalho foi avaliado o desempenho da lavagem da areia, dolomita e quartzo nos equipamentos tradicionais, tais como o *scrubber* e o peneiramento a úmido em comparação com o *Hydro-Clean*. Este equipamento foi desenvolvido no ano de 1998 na Alemanha pela empresa HAVER & BOECKER, no qual traz como diferencial um sistema de lavagem de alta pressão, capaz de reduzir o consumo de água e energia.

OBJETIVOS

Este trabalho tem como finalidade avaliar a aplicabilidade de lavagem mineral através do *Hydro-Clean* em comparação com o *scrubber* e o peneiramento a úmido, visando a eliminação de finos. Sua remoção torna-se necessária por conterem Al_2O_3 e Fe_2O_3 , consideradas prejudiciais aos processos posteriores, além de diminuir o valor do minério. Os materiais em estudo foram submetidos aos ensaios de lavagem e análise química, afim de se quantificar os finos removidos.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Beneficiamento

O beneficiamento de um minério consiste em um conjunto de operações unitárias que possibilita a sua utilização direta nas indústrias. O objetivo do beneficiamento é separar o material valioso das impurezas existentes no minério, também conhecidas como ganga. Além de se realizar a limpeza do minério, deve-se atentar com a sua granulometria de modo seja compatível com a demanda das indústrias.

A caracterização tecnológica e mineralogia de processo, pode ser realizada por uma gama de ensaios e equipamentos, tais como lupa, microscópio, difratometria de raios-x, separação em meio denso, determinação da molhabilidade e até mesmo ensaios preliminares de bancada. Tais análises possibilitam obter uma descrição qualitativa e quantitativa dos minerais presentes, bem como as características do minério como a granulometria, tamanho de liberação, índices de molhabilidade, composição química e a densidade (PORPHÍRIO; BARBOSA; BERTOLINO,2010).

As operações unitárias do beneficiamento possuem naturezas distintas, que são a fragmentação e a separação. A fragmentação tem como equipamentos os britadores e moinhos, cujo objetivo é atingir a granulometria desejada, sendo comumente seguida da operação de separação, mas não é regra. Entre essas operações de fragmentação e separação é comum que se tenha uma etapa de lavagem, isto é, um processo que visa realizar a limpeza do minério, removendo as partículas finas do mineral de interesse. A separação normalmente é realizada de acordo com a característica mais relevante do minério, seja por tamanho, espécie e entre outras. Na separação por tamanho, utilizamos o processo de peneiramento afim de controlar as operações de fragmentação e atingir a granulometria desejada. A fração fina gerada no peneiramento, geralmente é submetida ainda à operação de classificação afim de se obter um aproveitamento de seus finos. Na separação por espécie, é possível aproveitar os minérios de baixo teor através da operação de concentração. Para isso temos diversos processos como a catação manual, método gravítico, separação magnética, separação eletrostática e a flotação, a partir da

sua propriedade diferenciadora é que escolhemos qual método será utilizado (ANDRADE; DRUMMOND; ARAUJO, 2007).

2.2 Lavagem Mineral

A lavagem mineral é um processo fundamental presente no beneficiamento de diversos minérios comerciais que apresentam materiais finos. Geralmente, trata-se de um material indesejado que não só prejudica os processos posteriores de beneficiamento mas também diminui o seu valor agregado, pois reduz o teor do minério. Para alguns minérios como a bauxita, por exemplo, a presença de lamas são nocivas ao processamento subsequente. A presença da caulinita, material fino, é extremamente prejudicial ao beneficiamento pois trata-se de um mineral deletério, capaz de reagir com o agente lixiviante (NaOH), formando um produto insolúvel e indesejável, que impede a recuperação da gibbsita, mineral útil da bauxita. No processo de flotacão, a superfície do mineral de interesse precisa estar limpa para que ocorra maior interação e seja concentrado. Analisando apenas a granulometria, dependendo do minério, é possível identificar diferenças notáveis, geralmente, o constituinte mais grosso é o próprio mineral de interesse, enquanto que o constituinte mais fino, normalmente é um material argiloso ou argila. A lama ou argila (argilominerais) é definida como sendo um material natural, terrosos e com granulação fina. Embora não se tenha um consenso quanto à faixa granulométrica das lamas, SANTOS et al. (1975) cita que após inúmeros ensaios granulométricos, os argilominerais mostraram-se a tendência de se concentrarem na fração de diâmetro inferior a 2 μm . As argilas são compostas por argilominerais, que por sua vez são constituídos por silicatos hidratados de alumínio e ferro, podendo ainda conter traços de elementos alcalinos, alcalinos terrosos, além de minerais e matéria orgânica.

Um outro processo pode ocorrer simultaneamente à lavagem do minério, que é a desagregação do minério. Segundo Trajano (1996), a desagregação difere da lavagem por ser um processo de destacamento de partículas, em que estão ligadas frouxamente por cimento incoerente, na maioria das vezes argiloso. Ambos os processos ocorrem juntos, a escolha dos métodos e equipamentos ideais vão depender,

especificamente do tipo de material a ser estudado, do seu tamanho (granulometria) e dos objetivos e resultados desejados. Tais processos ocorrem devido ao choque das partículas com o recipiente e o choque entre partículas. A atrição é realizada por meio do esfregamento de partículas maiores e mais duras umas contra as outras. A operação unitária escrubagem de minério pode ser definida como a desagregação por meio de forças relativamente leves, porém suficiente para separar grãos unidos por ligações brandas ou desfazer materiais aglomerados não consolidados, tais como as argilas. Este processo visa a limpeza por desagregação das partículas de argilas dos minerais, podendo ser realizado por diversos métodos dependendo da granulometria do material aderido ao mineral de interesse. Esse fenômeno se observa com maior intensidade no equipamento *scrubber* (TAGGART, 1945).

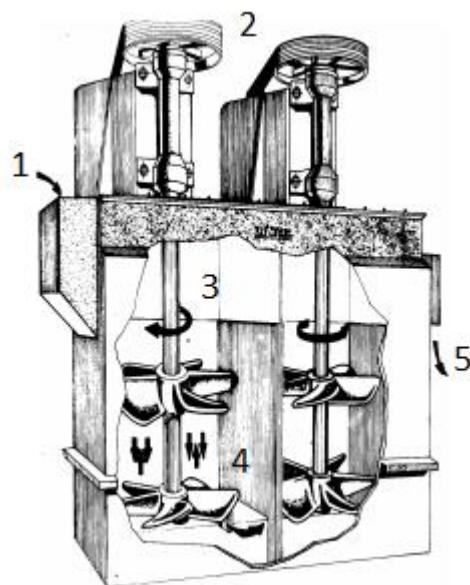
A lavagem mineral é um processo fundamental em cavas secas, CHAVES et al. (2012) o consideram a primeira operação de qualquer fluxograma, já para cavas imersas tal operação tem pouca relevância. Os equipamentos tradicionais utilizados na limpeza de minérios são: o *log washer* e o *drum scrubber*. Em contrapartida, novos métodos e equipamentos foram desenvolvidos recentemente, como por exemplo o *Hydro-Clean*.

2.3 Máquina de atrição

As máquinas de atrição possuem alta eficiência sendo usadas para liberar materiais deletérios e removê-los do material de interesse. São bastante eficientes na remoção de argilas e na separação de partículas aglomeradas. Este equipamento é composto por um tanque com duas hélices, posicionados de forma opostas. Isso faz com que as partículas se atritem intensamente umas com as outras, limpando a sua superfície e provocando a desintegração dos aglomerados. Em alguns casos, utilizam-se múltiplas células por máquina afim de se facilitar o *by-pass*, seguido de um ciclone para separar o material de interesse dos finos. Normalmente, a máquina de atrição é alimentada com a polpa, entre 60 e 80% de concentração em sólidos, sua eficiência melhora com o aumento da concentração de sólidos. O tamanho do material de alimentação é limitado a 6 mm para materiais com densidade próxima de 2,7 g/cm³, pois apesar de se ter uma atrição eficiente pode ocorrer a obstrução da máquina. Em geral, são utilizados em

vidros, minerais pesados e areia industrial, materiais que precisam de uma atrição intensiva (YOUNG; KAWATRA; DUNNE, 2019).

Figura 1 – Desenho esquemático da máquina de atrição: 1-Alimentação, 2-Correia com polias, 3-Rolamento, 4-Hélices, 5-Saída

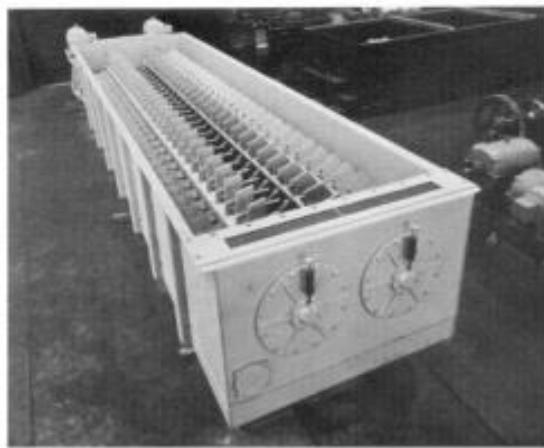


Fonte: CHAVES, 2010

2.4 Log Washer

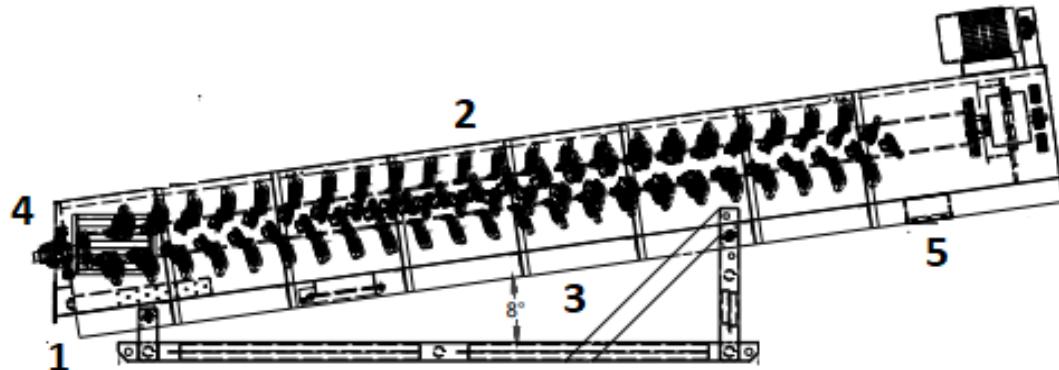
O *log washer* também conhecido como “lavador de cascalho”, é aplicado na lavagem de materiais que necessitam de uma desagregação mais intensiva. Portanto, é indicado para processos que envolvam lavagens sucessivas, tais como argilas insolúveis, rochas macias e alguns tipos de agregados. O *log washer* possui um compartimento inferior denominado como tanque de decantação e um vertedor, localizado em uma das extremidades, afim de controlar o fluxo de saída de partículas finas. A hélice é composta por palhetas, segmentos montados perpendicularmente ao eixo do equipamento, que mantêm as partículas finas em suspensão devido à turbulência causada pelo movimento da hélice e injeção de água. A desagregação do material é causada pela atrição do material com as palhetas, removendo partículas de argila e desintegrando os grãos grossos. Assim, os materiais finos em suspensão são removidos do equipamento pelo transbordamento em calhas (*overflow*) e os grãos limpos seguem pelo *underflow* (WHITAKER, 2001).

Figura 2 – Vista geral do equipamento log washer



Fonte: CHAVES, 2012

Figura 3 – Desenho esquemático do equipamento log washer: 1-Alimentação, 2-Espirais, 3-Material precipitado, 4-Overflow, 5-Underflow



Fonte: TAGGART, 1945

2.5 Classificador espiral

Os classificadores espiral foram construídos inicialmente para lavagem e classificação de minerais com alta dureza como pedras britadas, cascalho e outros minerais, com granulometria de 0,075 a 100 mm (YOUNG; KAWATRA; DUNNE, 2019). Os classificadores espiral utilizam a diferença de granulometria das partículas presentes na polpa para promover a separação de minerais. Nesses classificadores ocorre a separação por meio do movimento relativo dos seus grãos em um meio fluido, gerando um produto fino e outro grosso. O equipamento é constituído por um tanque inclinado com um parafuso sem fim, que gira em torno do seu eixo. As hélices giram com intuito

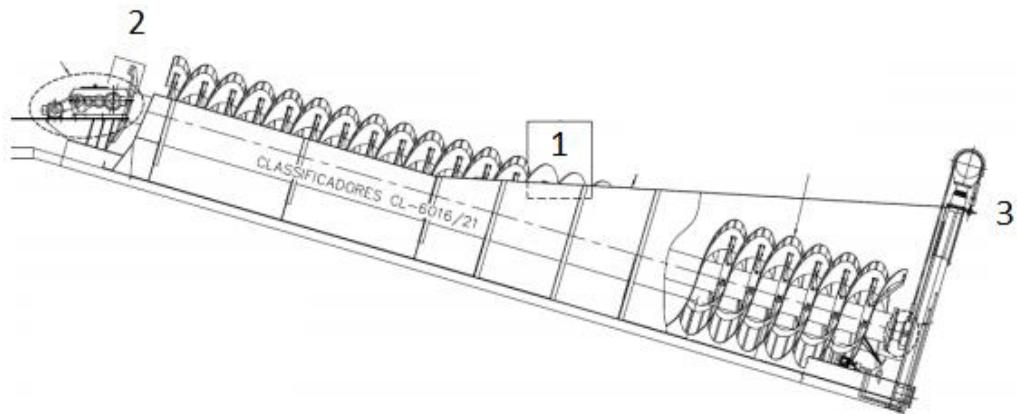
de remover o material depositado no fundo do tanque, conservando a polpa em suspensão e ao mesmo tempo promovendo uma atritoção moderada de suas partículas. As partículas finas são removidas por transbordo, *overflow*, e as partículas grossas são removidas pela espiral do fundo até a parte superior, *underflow* (CHAVES, 2012).

Figura 4 – Vista geral do equipamento classificador espiral



Fonte: CETEM, 2012

Figura 5 – Desenho esquemático do classificador espiral: 1-alimentação, 2-underflow, 3-overflow



Fonte: VALE, 2014

2.6 Lavadores de rosca

Os lavadores de rosca são utilizados para lavagem e desaguamento de partículas finas com granulometria inferior a 10 mm, sendo indicados para areia. O equipamento é composto por um tanque inclinado de decantação, com uma ou duas hélices acopladas, e uma injeção de água sob pressão, que é responsável pela remoção das partículas mais densas que se precipitam. Em contrapartida, as partículas mais finas ficam em suspensão, devido agitação causado pelo movimento das hélices. Os finos são removidos por transbordamento em calhas e encaminhas para os dutos de rejeito (LUZ, ALMEIDA; WHITAKER, CHAVES, 2012). Sua aparência é semelhante ao classificador espiral mas a dinâmica de lavagem é totalmente diferente.

Figura 6 – Vista geral do equipamento lavador de rosca



Fonte: CHAVES, 2012

2.7 Drum Scrubber

O *drum scrubber* é conhecido também como tambor desagregador, sendo frequentemente utilizado na desagregação e limpeza dos minérios que possuem uma quantidade elevada de argila, sendo indicado para grãos grossos em geral. O *drum scrubber* é composto por um cilindro aberto nas extremidades e ligeiramente inclinado em relação à horizontal. O cilindro gira em torno do seu próprio eixo, montado sobre rolos (VARELA, 2010). O material é alimentado juntamente com a água por um dos lados do cilindro, em seu interior as palhetas são instaladas com o objetivo de atritar e levantar o material continuamente, e assim provocar a desagregação e lavagem do material. No

Brasil este equipamento é bastante utilizado, principalmente nas minas de bauxita para remoção de argila aderidas às partículas de gibbsita (COSTA, 2010).

Figura 7 – Vista geral do drum scrubber



Fonte: CETEM, 2010

2.8 Blade Mill

Este equipamento foi desenvolvido para ajudar na remoção superficial de argila e/ou poeira que ficam na superfície das partículas. Não foi projetado para remover argilas aglomeradas, nem mesmo para alcançar alta porcentagem de eliminação. Eles são utilizados em combinação com outro equipamento de processamento para melhorar a lavagem a jusante e separação do material. O *blade mill* se assemelha bastante ao lavador de rosca, porém sua função é bem diferente. A maior diferença é que todo material ou água que entra no equipamento deve sair por baixo, no lado oposto da alimentação. Não existe overflow nesse tipo de unidade, a combinação de pás apresenta formatos alternados ao longo do seu eixo. O seu funcionamento consiste no trabalho alternado de pás e hélices do equipamento, que fica levemente inclinado, de 0 a 5° em relação a superfície. Devido a grande quantidade de polpa que saem do equipamento não é viável o transporte por correias. Existem diversas aplicações em que o *blade mill* pode ser utilizado, desde partículas finas até as mais grosseiras (YOUNG; KAWATRA; DUNNE, 2019).

Figura 8: Vista interna do equipamento *Blade Mill*



Fonte: SME MINERAL PROCESSING & EXTRACTIVE METALLURGY HANDBOOK, 2019

2.9 *Hydro-Clean*

O *Hydro-Clean* consiste em um sistema de lavagem de alta pressão, foi criado para lavagem de minérios que necessitem de altos níveis de limpidez. O material a ser lavado deve ser inserido na câmara de lavagem e em seguida escolhe-se a peneira a ser utilizada, o tempo de permanência e a pressão do jato de água desejada. Conforme o material é lavado e desagregado, as partículas mais finas passam pela peneira e são coletadas pelo *underflow*. Enquanto que as partículas que permanecem retidas na peneira, mais grosseiras, são coletadas pelo *overflow*.

Figura 9: Vista geral do equipamento de lavagem *Hydro-Clean*



Fonte: HAVER & BOECKER

O *Hydro-Clean* foi desenvolvido pela empresa alemã HAVER & BOECKER, no qual consiste em um sistema de alta pressão de água, sendo capaz de atender as indústrias de matéria prima e de mineração. Tais indústrias têm como desafio, minimizar a proporção de grânulos finos produzidos a fim de atender os requisitos legais, regulamentação e normas cada vez mais exigentes. A necessidade de se reduzir a quantidade de rejeitos e aumentar a proporção do produto utilizável, garantem a redução de custos operacionais e aumentam o lucro de produção (VARELA, 2010)

Esse sistema contínuo apresenta alta capacidade de limpeza através de uma operação simples. O menor consumo de água em relação aos demais equipamentos de lavagem é uma característica a ser evidenciada, numa proporção de 0,1 a 0,2 m³ de água por uma tonelada de matéria prima. Segundo seu fabricante, o *Hydro-Clean* apresenta resultados excelentes para limpeza de materiais argilosos e até mesmo para metais nobres, que exigem um manuseio mais delicado.

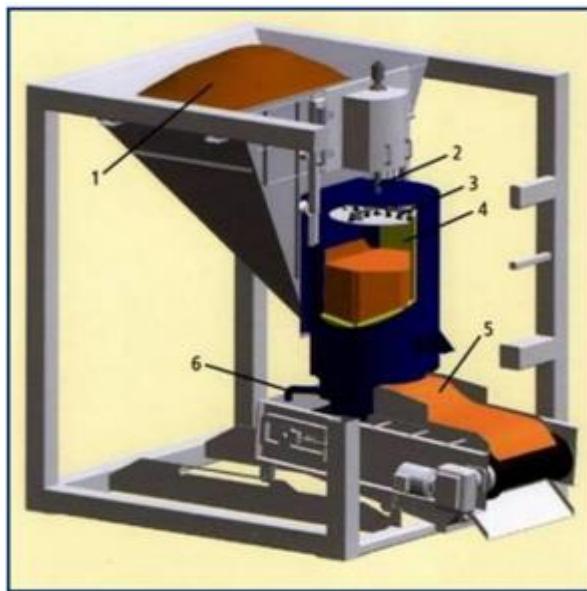
O funcionamento do *Hydro-Clean* se baseia na limpeza executada, exclusivamente, pelo impacto do jato de água de alta pressão e pelos processos de cisalhamento no leito da matéria-prima. Todos os seus componentes em movimento se localizam fora do leito, garantindo que não fiquem sujeitos ao desgaste por atrito.

O processo de limpeza do material na remoção de partículas finas aderentes e quaisquer aglomerados que possam estar presentes ocorre com alta pressão do *Hydro-Clean* em um sistema de lavagem. A bomba de água de alta pressão é acionada por um motor elétrico localizada dentro do sistema de lavagem. Inicialmente o material de alimentação passa pelo tambor de lavagem, que contém o rotor de lavagem, no qual funciona com rotação liberando jatos de água de alta pressão direcionados ao material com tamanho de 0 a 120 mm. Com isso, os minerais e os aglomerados são expostos à lavagem, tendo como produto um conteúdo fino, no passante, coletado pelo *underflow*. As partículas são lavadas continuamente, sendo coletadas pelo *overflow* e encaminhadas por meio de correias para classificação.

Inicialmente essa tecnologia foi testada na lavagem de agregados para a indústria de construção civil. Em relação ao processamento de minérios este equipamento já foi testado em diamante, ouro, calcário e gesso. Outros materiais estão sendo testados, ainda com projetos em fase como ferro, bauxita, caulim, fosfato, carvão,

esmeralda, entre outros. Essa tecnologia é também utilizada na reciclagem de materiais, mais precisamente, em resíduos de construção e demolição (COSTA, 2010).

Figura 10 –Desenho esquemático do equipamento *Hydro-Clean*. 1-Material de entrada(carregamento), 2-Rotor de lavagem, 3-Bico de alta pressão, 4-Câmara onde será feito a lavagem do material, 5-Material de saída, 6-Água contaminada de descarte



Fonte: HAVER & BOECKER

Na tabela 1, temos a comparação dos principais parâmetros operacionais para os diversos máquinas utilizadas na lavagem mineral. Na tabela 2, temos novamente uma comparação dos mesmos parâmetros, porém foram selecionados modelos que apresentam uma mesma capacidade de produção.

Tabela 1: Comparação de parâmetros entre os sistemas de lavagens

	Tamanho máximo de partícula (mm / pol.)	Taxa máxima de produção (t/h)	Consumo de energia (KWh/t)	Consumo de água (m ³ /t)	Peso do equipamento vazio (t)
Classificador Espiral	19 / ¾	950	0,06–0,55	0,1 – 3,3	2,5 – 23
	100 / 4	1100	0,4 – 2,25	0,45 – 1,7	2,7 – 18
Log washer	140 / 5 ½	190	0,15 – 2,2	0,1 – 0,95	15 – 32,5
Scrubber	500 / 20	1700	0,095 – 1,5	0,2 – 1,45	16 – 68
Hydro-Clean	150 / 6	400	0,3 – 0,5	0,1 – 0,2	5,5 – 8

Fonte: HAVER & BOECKER

Tabela 2 – Comparação de parâmetros entre os equipamentos mais utilizados de cada tipo

Equipamento	Modelo	Capacity (t/h)	Tamanho máximo de partícula (mm)	Consumo de água (m³/h)	Consumo de energia (kW)	Peso do equipamento vazio (t)
Hydro Clean	HC 1000	200	150	16-21	51 - 116	8
Log washer	46'' x 35'	190	90	17-170	149	33
Scrubber	72'' x 10'6''	180	114	125-236	56	16

Fonte: HAVER & BOECKER

2.10 Estudo de Caso

A etapa de lavagem mineral se faz necessária em grande parte das plantas de tratamento mineral que apresentam minério com finos aglomerados. A lavagem mineral é aplicado somente em materiais que não possuem restrição de serem processado à úmido. O processamento a úmido, geralmente está vinculada a altos custos relacionadas a um grande consumo de água e energia. As indústrias de mineração buscam por alternativas e soluções que reduzem o uso de recursos naturais mas que sejam ainda economicamente viáveis e capazes de suprir suas necessidades. Afim de investigar a eficiência de lavagem do Hydro-Clean na eliminação de finos, buscou-se três materiais distintos, que apresentassem partículas finas aderidas às partículas minerais.

2.10.1 Areia

O primeiro material a ser estudado foi a areia, que foi fornecida pela empresa Valpa – Mineração e Terraplanagem, tendo como principal aplicação em indústria de construção. Esta areia é proveniente de leitos de rios e dunas, apresentando-se na forma de sedimento inconsolidado, diferentemente da areia encontrada nas minas de quartzo, que se apresentam na forma consolidada. A areia pode ser definida como material detritíco com variação de tamanhos de partículas definidos, compostos basicamente de partículas de quartzo. Outros minerais também podem ser encontrados juntamente, tais como o feldspato, mica e turmalina, dependendo da proporção destes presentes podem afetar a coloração da areia, no caso temos uma areia de cor cinza, o que pode indicar a

presença de lamas ou lodos. (CHAVES, 2002). As argilas podem formar películas envolvendo os grãos de areia, o que ocasiona fissuras e retrações no material, sendo portanto prejudiciais à indústria de construção (PETRUCCI; PAULON, 1955). A remoção de partículas aderidas à areia, geralmente, é realizada no equipamento *log washer*, afim de se obter uma desagregação das partículas, seguida de uma classificação por ciclones, onde as partículas maiores são descarregadas pelo *underflow* e as menores pelo *overflow*.

2.10.2 Dolomita

O segundo material a ser estudado foi a dolomita, que foi fornecida pela empresa Mineração Jundu, tendo como principais aplicações industriais de vidros, cerâmicas, polímeros e refratários. Os dolomitos são provenientes de rochas carbonáticas sedimentares, compostas essencialmente por dolomita ($\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$). Sua origem é baseada na teoria da substituição dos metais, acredita-se que o cálcio presente no calcário calcítico se substituiu pelo magnésio, presente em águas com elevado teor de sais de magnésio. As impurezas mais comuns encontradas na dolomita são as argilas, mica e feldspato (LUZ, 2008). As aplicações da dolomita são bastante sofisticadas, exigindo baixos níveis de impurezas, sendo portanto, necessário a sua remoção desses finos.

2.10.3 Quartzo

O terceiro material a ser estudado foi o quartzo, que foi fornecida pela empresa do Grupo RIMA, tendo como principal aplicação na produção de ligas a base de silício. Tais produtos apresentam um controle rígido de qualidade, suas matérias primas devem apresentar elevada pureza, para que possam ser utilizados nas indústrias de fundição e siderurgia. O quartzo pode ser encontrado largamente na natureza em rochas magmáticas, sedimentares e metamórficas, na sua forma monocristalina, policristalina e amorfia. É formada por uma estrutura cristalina trigonal composta por tetraedros de dióxido de silício, denominado sílica (SiO_2). Geralmente é incolor, apresentando um brilho vítreo, pode variar de transparente a translúcido dependendo das impurezas químicas presentes. As impurezas mais comuns de serem encontrados no quartzo são

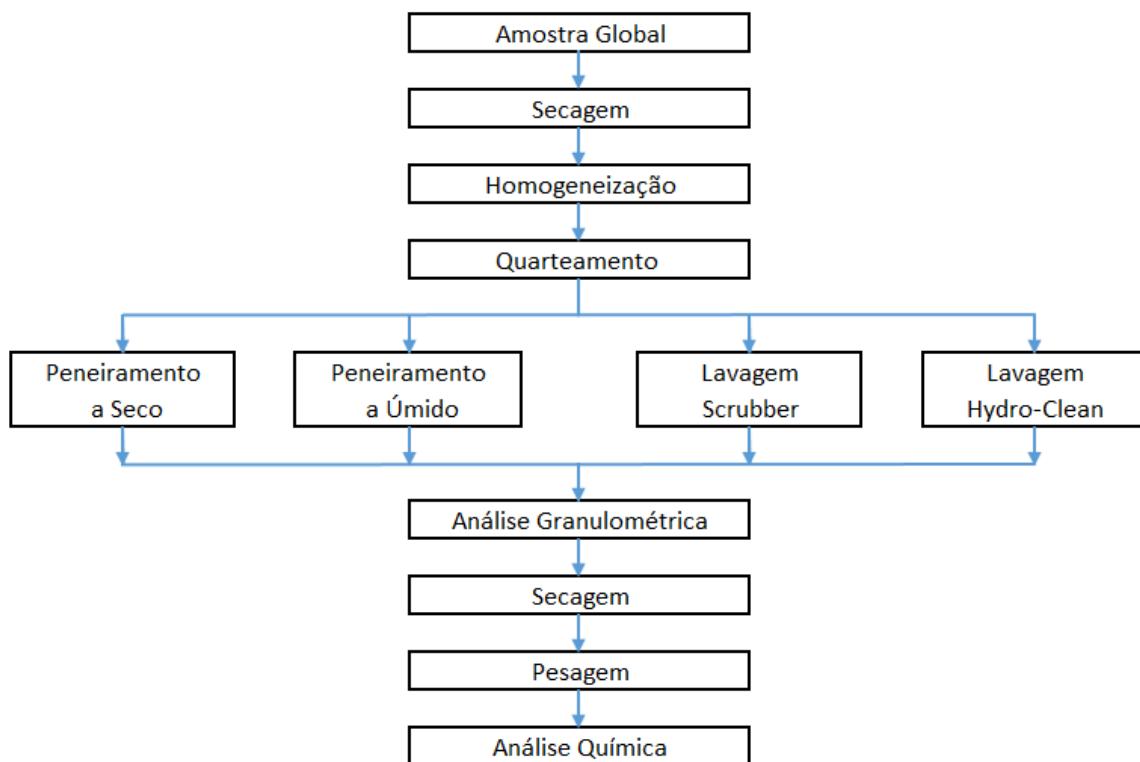
as argilas, compostas de alumínio e ferro, que devem ser eliminadas para satisfazerem o mercado consumidor (GUZZO, 2008).

3. MATERIAIS E MÉTODOS

3.1 AMOSTRAGEM E PREPARAÇÃO

O fluxograma a seguir foi realizado com o intuito de organizar e auxiliar na execução dos ensaios, ele descreve todas atividades realizadas no Laboratório de Tratamento de Minérios do Departamento de Minas e de Petróleo da USP (LTM), para as amostras de areia, dolomita e quartzo.

Figura 11: Fluxograma geral de atividades



Fonte: Arquivo pessoal

As amostras globais dos três materiais foram recebidas em sacos com o peso de 20 kg. Foram submetidas à etapa de secagem por se apresentarem úmidas. Com as amostras devidamente secas, foi necessário realizar o quarteamento das mesmas, para isso realizou-se a homogeneização, por meio de pilhas longitudinais afim de se garantir que as alíquotas fossem representativas. As amostras foram quarteadas diversas vezes

afim de se obterem alíquotas das amostras, no caso 7 alíquotas de cada amostra com peso próximo de 500 g.

Com as alíquotas prontas para a realização dos ensaios posteriores, fez-se necessário conhecer a distribuição de tamanhos das partículas que compõem cada amostra. Para isso foi realizado a análise granulométrica pelo método de peneiramento, sendo as seguintes malhas utilizadas:

Areia: 12,6 mm, 6,3 mm, 3,35 mm, 1,7 mm, 850 μm , 425 μm , 212 μm e 106 μm

Dolomita: 6,3 mm, 3,35 mm, 1,70 mm, 850 μm , 425 μm , 212 μm e 106 μm

Quartzo: 19,0 mm, 16,0 mm, 9,5 mm, 3,35 mm, 1,18 mm, 425 μm , 106 μm

3.2 PENEIRAMENTO A SECO

Inicialmente fez-se o peneiramento a seco em um peneirador suspenso por 10 minutos. Após o peneiramento as frações foram coletadas para pesagem.

3.3 PENEIRAMENTO A ÚMIDO

Em seguida foi realizado o peneiramento a úmido de forma manual. As amostras peneiradas foram colocadas para secagem na estufa com temperatura de 70°C e por um tempo de 24h, até que estivessem totalmente seca. O material passante, por ser muito fino fica em suspensão, sendo necessário o uso de floculante para acelerar o processo de sedimentação, nos casos da areia e da dolomita. Retirando o excesso de água, os finos já podem ser separados e colocados na estufa. Com as frações secas foi feita a pesagem e o armazenamento delas.

3.4 ENSAIO DE LAVAGEM NO SCRUBBER

A escrubagem também pode ser realizado por meio da betoneira, porém devido a pouca quantidade de massa a ser ensaiada e a sua maior capacidade de processamento, optou-se pelo scrubber. Os ensaios foram realizados em um scrubber laboratorial, que desempenha a mesma função que o de escala industrial mas com

menor capacidade. O jarro utilizado era de inox, com as seguintes dimensões 305 mm de comprimento e 195 mm de diâmetro, com capacidade de 3,8 L. Foi preparada uma polpa com massa mínima de 50% de sólidos a ser ensaiada, ou seja, como utilizamos, aproximadamente 500 g de sólidos, foi utilizado 500 mL de água. O jarro então é colocado para rotacionar com velocidade baixa, de 33,60 rpm por 10 minutos. Ao final de escrubagem, a polpa é retirada, sendo posteriormente submetida à análise granulométrica.

Figura 12 – Vista geral do jarro em inox (*scrubber*)



Fonte: Arquivo pessoal

3.5 ENSAIO DE LAVAGEM NO HYDRO-CLEAN

O modelo utilizado para o estudo foi o HC 200-LAB do *Hydro-Clean* (HAVER TYLER). Trata-se de um modelo laboratorial, com dimensão menor que os utilizados na indústria. Este modelo permite realizar análises com maior facilidade e menor tempo de processo, proporcionando resultados semelhantes ao modelo industrial. Por ser um modelo de menor escala algumas especificações diferem do original. Nesse equipamento a câmara de lavagem é integrada com duas peneiras, de aberturas 0,8 mm e 2,0 mm e um bocal rotativo. O tamanho máximo do material de alimentação é 38 mm e a capacidade máxima de pressão de água é de 140 bar.

A lavagem com o Hydroclean foi realizada testando-se três pressões diferentes para cada material, 45 bar (baixa pressão), 105 bar (média pressão) e 150 bar (alta pressão). Inicialmente a alíquota é colocada em cima de uma peneira de 2 mm, dentro da câmara de lavagem. Em seguida a pressão deve ser ajustada e o tempo de operação testado foi de 2 minutos. Após a realização dos ensaios com cada pressão, o material retido e o passante são coletados e finalmente, submetidos à análise granulométrica.

Figura 13 – Vista geral do equipamento *HC 200-LAB* da Haver: 1-câmara de lavagem, 2-coletor (*underflow*), 3-bico de alta pressão, 4-peneira, 5-botão de ligar/desligar, 6-timer, 7-medidor de pressão



Fonte: Arquivo pessoal

3.6 ANÁLISE QUÍMICA

As análises de FRX foram realizadas no LCT (Laboratório de Caracterização Tecnológica) no Departamento de Engenharia de Minas e de Petróleo da USP. Antes das amostras serem analisadas foi necessário realizar uma britagem das amostras, afim de obter uma granulometria inferior a 1,18 mm, que é o tamanho máximo aceito para análise química. Em anexo, encontram-se as análises químicas completas realizadas para os três materiais em estudo.

4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

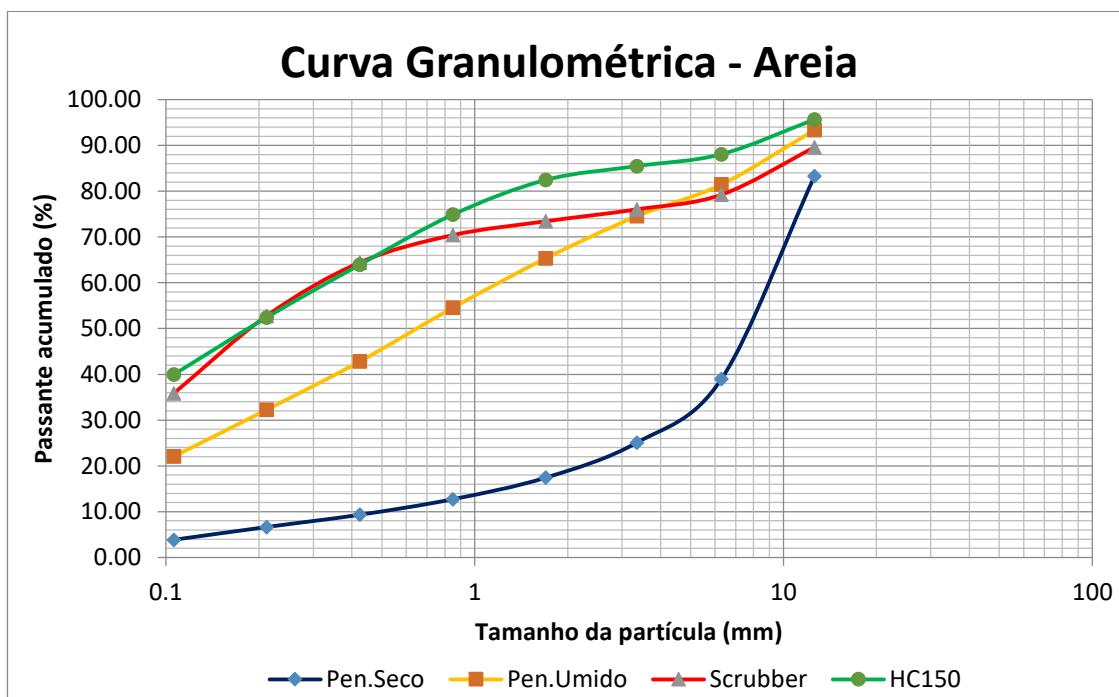
4.1 AREIA

Analisando a areia antes dos ensaios de lavagem, observou-se a presença de bastante finos, pois ao manusear o material, suas partículas se desintegram facilmente, por meio da análise granulométrica poderemos quantificar tais finos. Com os ensaios de lavagem, por peneiramento a úmido e *scrubber*, observou-se a remoção desses finos devido à presença de partículas de coloração marrom claro, para ambos os ensaios. Observamos que os ensaios do *Hydro-Clean* para baixa e pressão apresentaram resultados muito similares. Provavelmente, essa coincidência pode estar relacionada a algum problema ou desajuste que esteja vinculado com a pressão de saída do jato de água, de tal forma que a pressão indicada não corresponde à pressão efetiva do equipamento. Então por isso, nos demais ensaios trabalhamos sempre com o *Hydro-Clean* com alta pressão, porém todos os resultados se encontram nos apêndices. No ensaio de lavagem com o *Hydro-Clean* também é possível ver tais partículas, porém em menor escala, muito provavelmente devido à sua fragmentação pelo jato de alta pressão do equipamento. É de se notar que mesmo no *Hydro-Clean* ainda é possível identificar resquícios de finos em todas as suas frações. A partir da fração -3,35 mm, notou-se o aparecimento de partículas brancas nas amostras lavadas pelo *scrubber* e no *Hydro-Clean*. O passante em 106 μm do *Hydro-Clean* apresentou uma coloração mais clara que as demais amostras, isto pode ser um indício de que parte as partículas de areia passaram devido à sua fragmentação pelo jato de água (Apêndice C).

4.1.1 Análise Granulométrica

Pela análise das curvas granulométricas dos ensaios da areia, pôde-se ver que as curvas apresentaram um comportamento dentro do esperado. No ensaio de peneiramento a seco, podemos ver que a amostra de areia não teve êxito no peneiramento, cerca de 61% da amostra ficou retida nas malhas acima de 6,3 mm e ainda a quantidade de finos gerado foi de 3,8%. Em compensação, os finos gerados nos demais ensaios foram mais significativos. No peneiramento a úmido, obteve-se 22% de material na fração passante, enquanto que no *scrubber* e no *Hydro-Clean*, foram de 36% e 40% respectivamente. Pôde-se ver que as curvas do *scrubber* e *Hydro-Clean* apresentaram um comportamento semelhante entre si, porém bem diferente dos demais. Isto pode ter sido ocasionado pela quebra dos grãos mais grossos da amostra de areia além da lavagem em si. E ainda é possível notar um gap entre as duas curvas, isso provavelmente ocorreu devido ao jato de alta pressão do *Hydro-Clean*, ocasionando maior fragmentação dessas partículas. Através dessa análise granulométrica constatou-se que o *Hydro-Clean* apresentou uma maior quantidade de material passante em 106 μm do que no *scrubber*, possivelmente isso se deve à fragmentação das partículas.

Gráfico 1 – Curva granulométrica da areia referente a cada ensaio



Fonte: Elaborado pelo autor

4.1.2 Análise Química

Tabela 3 – Resultado do ensaio de peneiramento a seco para areia

Fração	Massa (g)	Massa (%)	Teores (%)					Distribuição (%)				
			SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	K ₂ O	Outros	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	K ₂ O	Outros
+0.106 mm	500.69	96.14	68.20	15.40	4.91	3.05	8.44	96.36	95.56	95.59	95.98	95.77
-0.106 mm	20.11	3.86	64.10	17.80	5.64	3.18	9.28	3.64	4.44	4.41	4.02	4.23
Alim. Calculada	520.80	100.00	68.04	15.49	4.94	3.06	8.47	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0

Fonte: Elaborado pelo autor

Tabela 4 – Resultado do ensaio de peneiramento a úmido para areia

Fração	Massa (g)	Massa (%)	Teores (%)					Distribuição (%)				
			SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	K ₂ O	Outros	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	K ₂ O	Outros
+0.106 mm	397.91	77.94	70.60	13.50	4.96	2.77	8.17	80.79	70.14	73.00	76.36	72.61
-0.106 mm	112.63	22.06	59.30	20.30	6.48	3.03	10.89	19.21	29.86	27.00	23.64	27.39
Alim. Calculada	510.54	100.00	68.11	15.00	5.30	2.83	8.77	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0

Fonte: Elaborado pelo autor

Tabela 5 – Resultado do ensaio de lavagem no scrubber para areia

Fração	Massa (g)	Massa (%)	Teores (%)					Distribuição (%)				
			SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	K ₂ O	Outros	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	K ₂ O	Outros
+0.106 mm	310.31	64.17	75.50	10.80	4.12	2.91	6.67	70.16	48.07	52.34	63.39	50.16
-0.106 mm	173.26	35.83	57.50	20.90	6.72	3.01	11.87	29.84	51.93	47.66	36.61	49.84
Alim. Calculada	483.57	100.00	69.05	14.42	5.05	2.95	8.53	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0

Fonte: Elaborado pelo autor

Tabela 6 – Resultado do ensaio de lavagem no Hydro-Clean 150 bar para areia

Fração	Massa (g)	Massa (%)	Teores (%)					Distribuição (%)				
			SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	K ₂ O	Outros	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	K ₂ O	Outros
+0.106 mm	266.89	60.04	77.00	11.00	3.68	2.67	5.65	65.67	46.79	48.34	54.50	42.60
-0.106 mm	177.60	39.96	60.50	18.80	5.91	3.35	11.44	34.33	53.21	51.66	45.50	57.40
Alim. Calculada	444.49	100.00	70.41	14.12	4.57	2.94	7.96	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0

Fonte: Elaborado pelo autor

Tabela 7 – Desempenho dos ensaios para a areia

ENSAIOS	Recuperação para os finos (-106 µm)		Recuperação de massa para finos (- 106 µm)
	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	
Peneiramento a Seco	4,4%	4,4%	3,9%
Peneiramento a úmido	29,9%	27,0%	22,1%
Scrubber	51,9%	47,7%	35,8%
Hydro-Clean	53,2%	51,7%	40,0%

Fonte: Elaborado pelo autor

Com os resultados da análise química, pôde-se observar que a fragmentação das partículas de areia na lavagem com o *scrubber* e o *Hydro-Clean* não foram tão consideráveis com base na fração passante, quando comparados entre eles. Porém em relação aos demais, a fragmentação foi bastante expressiva. Em ambos, pôde-se observar uma boa eficiência na remoção das partículas finas, tanto no Al₂O₃ quanto no Fe₂O₃ apresentaram uma recuperação significativa para os finos, com valores até bem próximos.

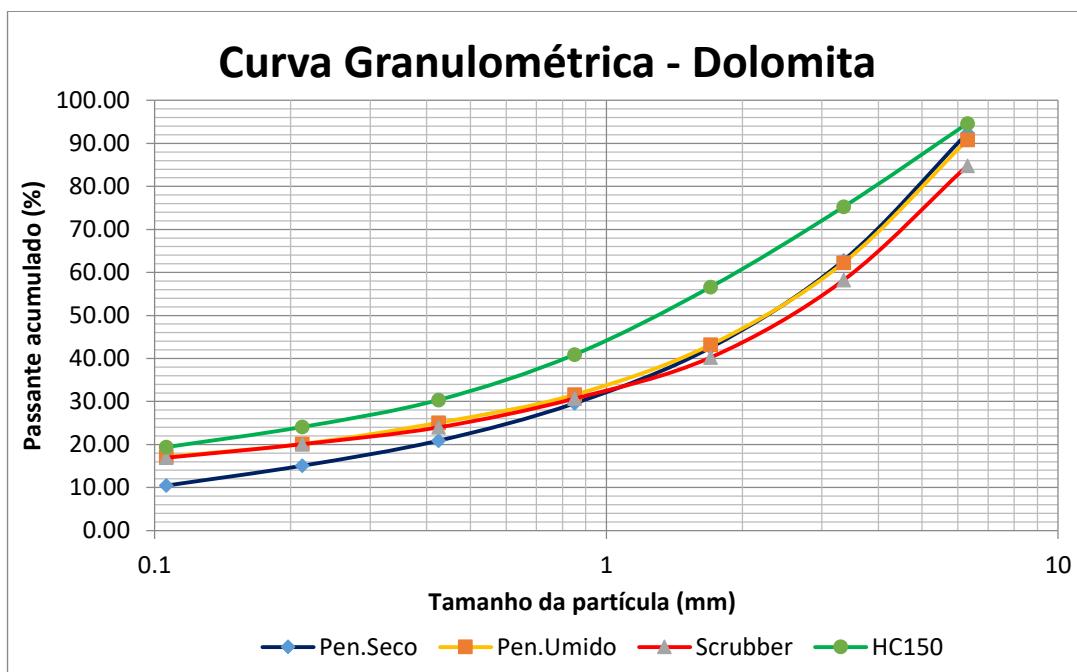
4.2 DOLOMITA

Analizando a amostra de dolomita pôde-se notar que o material é recoberto superficialmente por finos, apresentando um aspecto de coloração marrom característico das argilas. Após os ensaios de lavagem no *scrubber* e no *Hydro-Clean* verificamos uma mudança de coloração nas frações mais grossas em comparação com a amostra que foi apenas peneirada a úmido, tais amostras apresentaram uma coloração mais homogênea, caracterizando maior limpeza das partículas. Analisando as amostras lavadas no *scrubber* e no *Hydro-Clean*, podemos ver que há pouca alteração na coloração das partículas. A partir das frações -1,70 mm até -106 µm quase não é possível distinguir qual amostra corresponde a cada um dos ensaios de lavagem.

4.2.1 Análise Granulométrica

Analizando a distribuição de dolomita, podemos ver que as curvas apresentaram um comportamento bem semelhante. A curva de peneiramento a seco apresentou-se muito parecida com a curva de peneiramento a úmido nas frações acima de 850 μm , enquanto que nas frações mais finas o peneiramento a seco se mostrou menos eficiente, com 10% de finos. No *Hydro-Clean* podemos ver uma curva mais deslocada para cima que nos outros, mas ao analisar os finos gerados, praticamente não se obtiveram resultados tão superiores aos demais ensaios. A porcentagem de finos é bem próximo sendo que no *Hydro-Clean* obteve-se 19,4% de finos, enquanto que no *scrubber* e no peneiramento a úmido, foram de 17% em ambos. Através da análise granulométrica pôde-se notar que o *Hydroclean*, aparentemente não foi tão mais eficiente que o *scrubber* e o peneiramento a úmido, na remoção de finos e ainda promoveu a quebra das partículas.

Gráfico 2 – Curva granulométrica da dolomita referente a cada ensaio



Fonte: Elaborado pelo autor

4.2.2 Análise Química

Tabela 8 – Resultado do ensaio de peneiramento a seco para dolomita

Fração	Massa (g)	Massa (%)	Teores (%)					Distribuição (%)				
			CaO	MgO	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃
+ 0.106 mm	462.95	89.55	27.00	19.80	9.28	1.26	0.33	91.36	89.60	82.65	73.62	75.87
- 0.106 mm	54.00	10.45	21.90	19.70	16.70	3.87	0.90	8.64	10.40	17.35	26.38	24.13
Alim. Calculada	516.95	100.00	26.47	19.79	10.06	1.53	0.39	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0
Alim. Analisada			26.80	20.00	9.50	1.35	0.35					

Fonte: Elaborado pelo autor

Tabela 9 – Resultado do ensaio de lavagem no peneiramento a úmido para dolomita

Fração	Massa (g)	Massa (%)	Teores (%)					Distribuição (%)				
			CaO	MgO	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃
+ 0.106 mm	438.42	82.87	28.40	20.30	6.63	0.28	0.10	88.53	84.80	59.42	14.73	23.67
- 0.106 mm	90.63	17.13	17.80	17.60	21.90	7.84	1.56	11.47	15.20	40.58	85.27	76.33
Alim. Calculada	529.05	100.00	26.58	19.84	9.25	1.58	0.35	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0
Alim. Analisada			26.80	20.00	9.50	1.35	0.35					

Fonte: Elaborado pelo autor

Tabela 10 – Resultado do ensaio de lavagem no scrubber para dolomita

Fração	Massa (g)	Massa (%)	Teores (%)					Distribuição (%)				
			CaO	MgO	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃
+ 0.106 mm	452.89	83.08	28.80	20.50	5.37	0.21	<0.1	88.32	84.55	54.63	13.39	24.18
- 0.106 mm	92.21	16.92	18.70	18.40	21.90	6.67	1.54	11.68	15.45	45.37	86.61	75.82
Alim. Calculada	545.10	100.00	27.09	20.14	8.17	1.30	0.34	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0
Alim. Analisada			26.80	20.00	9.50	1.35	0.35					

Fonte: Elaborado pelo autor

Tabela 11 – Resultado do ensaio lavagem no HydroClean 150 bar para dolomita

Fração	Massa (g)	Massa (%)	Teores (%)					Distribuição (%)				
			CaO	MgO	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃
+ 0.106 mm	426.97	80.62	28.80	20.40	6.67	0.23	<0.1	86.06	82.02	57.86	13.93	23.55
- 0.106 mm	102.66	19.38	19.40	18.60	20.20	5.91	1.35	13.94	17.98	42.14	86.07	76.45
Alim. Calculada	529.63	100.00	26.98	20.05	9.29	1.33	0.34	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0
Alim. Analisada			26.80	20.00	9.50	1.35	0.35					

Fonte: Elaborado pelo autor

Infelizmente, não foi possível estar repetindo os ensaios afim de se obter um desvio padrão por teor para cada ensaio. Mas podemos fazer uma aproximação, utilizando o desvio padrão obtido pela análise química de 3 amostras da alimentação.

Gráfico 3 – Teor de SiO₂ na dolomita (+0,106 mm)

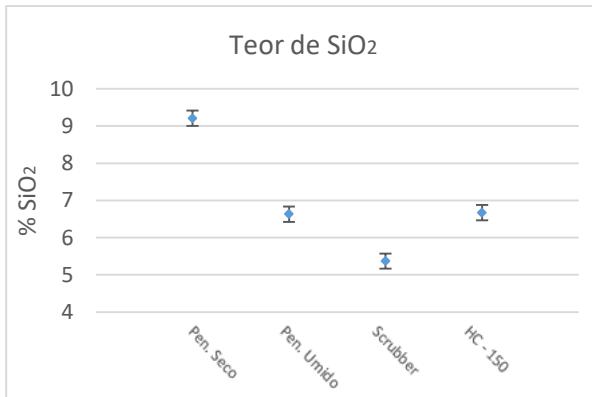


Gráfico 4 – Teor de SiO₂ na dolomita (-0,106 mm)

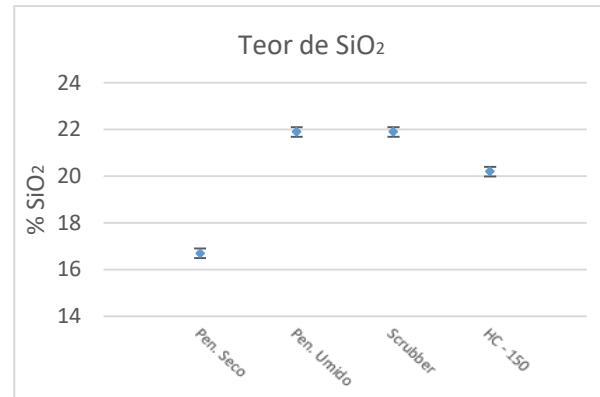


Gráfico 5 – Teor de Al₂O₃ na dolomita (+0,106 mm)

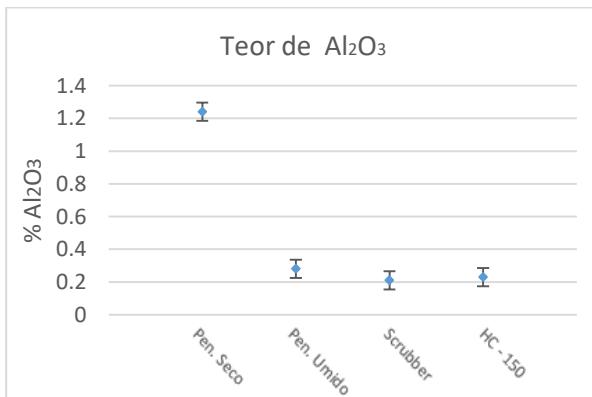


Gráfico 6 – Teor de Al₂O₃ na dolomita (-0,106 mm)

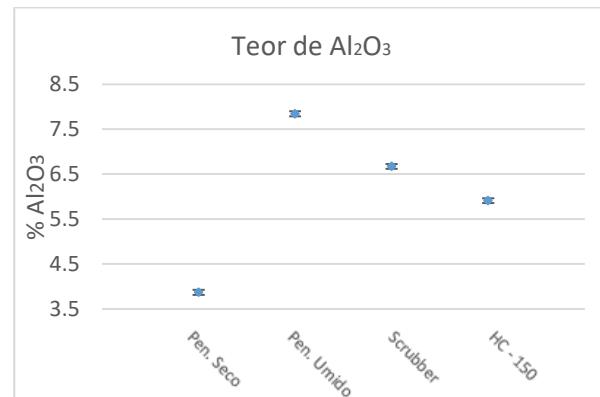


Gráfico 7 – Teor de Fe₂O₃ na dolomita (+0,106 mm)

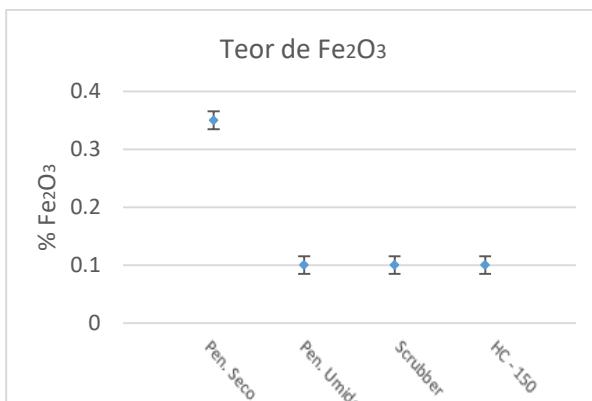


Gráfico 8 – Teor de Fe₂O₃ na dolomita (-0,106 mm)

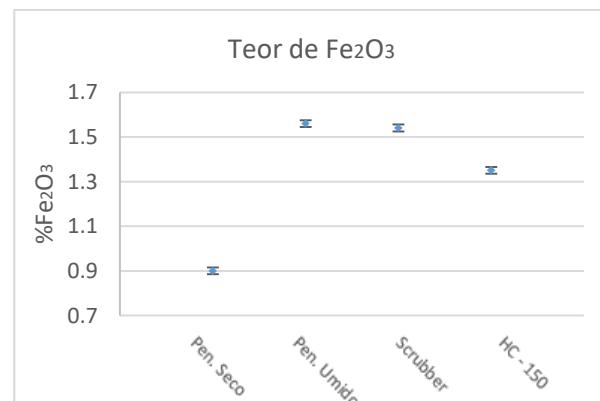


Tabela 12 – Desempenho dos ensaios para a dolomita

Ensaios	Recuperação para os finos (-106 µm)		Recuperação em massa para os finos (-106 µm)
	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	
Peneiramento a Seco	26,4%	24,1%	10,5%
Peneiramento a úmido	85,0%	76,3%	17,1%
Scrubber	86,6%	75,8%	16,9%
Hydro-Clean	86,1%	76,5%	19,4%

Fonte: Elaborado pelo autor

Com os resultados da análise química pôde-se notar que a porcentagem de recuperação de finos do Al₂O₃ foram semelhantes nos três ensaios de lavagem, assim como a recuperação dos finos de Fe₂O₃. Tais resultados apontam que o material fino, provavelmente, estavam ligadas fracamente com as partículas grosseiras da dolomita apenas recobrindo a sua superfície. Notou-se que a porcentagem de recuperação em massa para os três ensaios também foram bem próximas, ou seja, a fragmentação das partículas não foi significativa como nos ensaios da areia..

4.3 QUARTZO

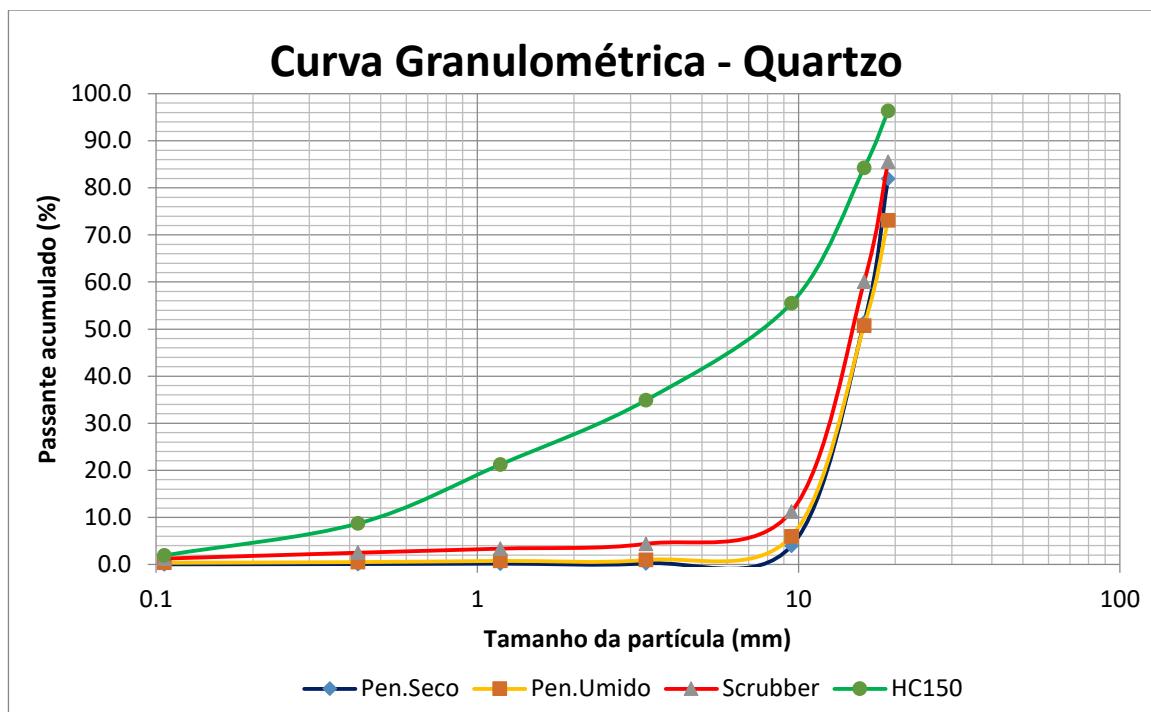
Analizando as amostras de quartzo, pôde-se observar que suas partículas já apresentam uma certa limpidez em comparação com a areia e a dolomita. Tanto é que, ao se comparar a amostra sem lavagem com a de peneiramento a úmido, observa-se pouca diferença na sua coloração. Após os ensaios de lavagem com o *Hydro-Clean* e o *scrubber*, pôde-se verificar a limpeza do quartzo por meio da alteração de cor de suas partículas. Visualmente podemos ver que a amostra sem lavagem apresenta uma coloração bege enquanto que no *scrubber* e *Hydro-Clean* temos uma coloração branca, indicando que ocorreu remoção de finos. As partículas ensaiadas no *scrubber* apresentaram tonalidade branca porém intermediária entre o *Hydro-Clean* e a peneirada a úmido. Portanto na comparação entre o *scrubber* e o *Hydro-Clean*, podemos ver que último apresentou, resultados superiores de lavagem nas frações acima de 106 µm. O passante do *Hydro-Clean* em 106 µm apresentou uma coloração bem mais clara que

nas demais amostras, indicando que parte do quartzo pode ter passado devido à sua quebra pelos jatos de alta pressão. Desde as frações mais grossas verificou-se que a porcentagem de sólidos era menor que as dos demais ensaios, indicando a ocorrência da quebra de suas partículas. Já o passante em 106 μm do peneiramento a úmido apresentou coloração cinza, muito diferente das demais amostras referente a mesma fração passante. Isto pode ter sido ocasionado pela variabilidade, em que ao se fazer o quarteamento da amostra, a presença de um grão mais escuro, provavelmente um *outlier*, foi capaz de ocasionar tal mudança de cor. Infelizmente, devido ao tempo limitado não foi possível refazer o experimento.

4.3.1 Análise Granulométrica

Analizando o gráfico da distribuição de quartzo, podemos ver que as curvas apresentaram comportamento semelhante. A grande diferença é em relação à curva do *Hydro-Clean* que apresentou deslocamento em relação às demais desde a fração mais grossa. A amostra de quartzo se mostrou visualmente bem limpa, portanto, esse deslocamento talvez seja mais devido à quebra das suas partículas mais grossas do que à própria limpeza. Os demais ensaios apresentaram curvas bem próximas, com destaque para a curva do *scrubber* que se apresenta um pouco mais elevada que as demais. Isto pode ser devido também à quebra das partículas pela atrito entre elas, tendo menores proporções que as quebras do *Hydro-Clean*. Analisando os finos gerados de cada ensaio para o quartzo, podemos notar que todos ensaios apresentaram resultado semelhante, não havendo diferenças significativas entre eles. No *Hydro-Clean* os finos gerados (-106 μm) foram de 2% enquanto que no *scrubber* e no peneiramento a úmido, foram de 1,2% e 0,3%, respectivamente. Somente pela análise granulométrica do quartzo, pôde-se observar que o *Hydro-Clean* não foi tão mais eficiente na remoção de finos que os demais ensaios, além de promover a quebra de partículas. Porém, se faz necessário realizar uma análise química, afim de saber o quanto de Al_2O_3 e Fe_2O_3 foi de fato removido da amostra.

Gráfico 9 – Curva granulométrica da quartzo referente a cada ensaio



Fonte: Elaborado pelo autor

4.3.2 Análise Química

Tabela 13 – Resultado do ensaio de peneiramento a seco para o quartzo

Fração	Massa (g)	Massa (%)	Teores (%)			Distribuição (%)		
			SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃
+3,35 mm	510.47	99.77	97.70	0.19	1.23	99.78	98.89	99.40
-3,35 mm	1.16	0.23	93.40	0.94	3.24	0.22	1.11	0.60
Alim. Calculada	511.63	100.00	96.93	0.20	1.31	100.0	100.0	100.0
Alim. Analisada			97.00	0.31	1.73			

Fonte: Elaborado pelo autor

Tabela 14 – Resultado do ensaio de lavagem no scrubber para o quartzo

Fração	Massa (g)	Massa (%)	Teores (%)			Distribuição (%)		
			SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃
+3,35 mm	494.54	95.62	97.10	0.12	1.33	95.79	63.31	92.64
-3,35 mm	22.63	4.38	93.30	1.52	2.31	4.21	36.69	7.36
Alim. Calculada	517.17	100.00	96.93	0.18	1.37	100.0	100.0	100.0
Alim. Analisada			97.00	0.31	1.73			

Fonte: Elaborado pelo autor

Tabela 15 – Resultado do ensaio de lavagem no *Hydro-Clean* para o quartzo

Fração	Massa (g)	Massa (%)	Teores (%)			Distribuição (%)		
			SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃
+3,35 mm	351.78	65.10	98.50	0.10	0.05	65.43	24.34	15.72
-3,35 mm	188.55	34.90	97.10	0.58	0.50	34.57	75.66	84.28
Alim. Calculada	540.33	100.00	98.01	0.27	0.21	100.0	100.0	100.0
Alim. Analisada			97.0	0.31	1.73			

Fonte: Elaborado pelo autor

Novamente, não foi possível estar repetindo os ensaios e com isso utilizou-se o desvio padrão obtido pelas 3 análises químicas de alimentação.

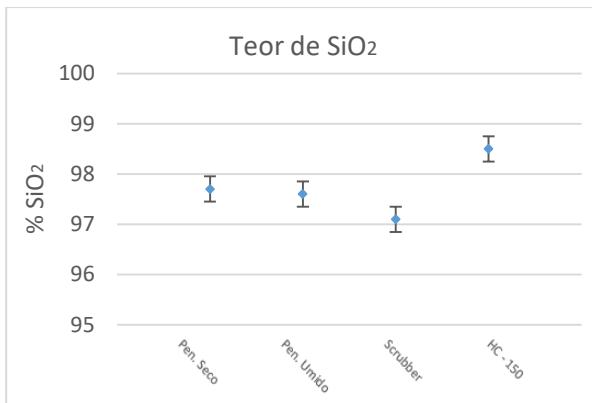
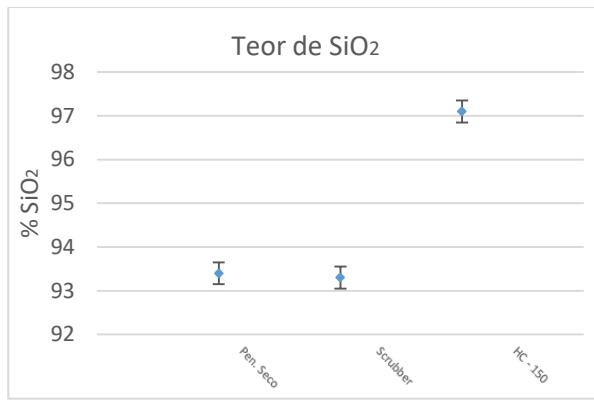
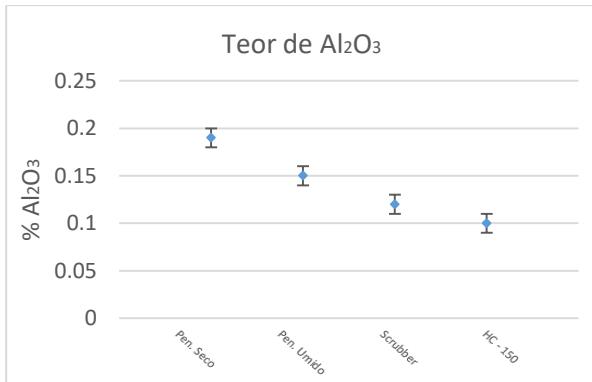
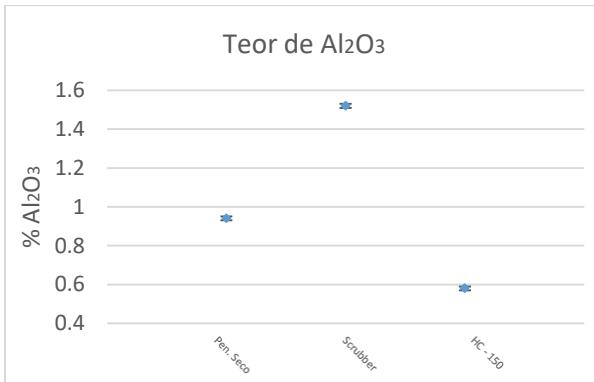
Gráfico 10 – Teor de SiO₂ no quartzo (+3,35 mm)Gráfico 11 – Teor de SiO₂ no quartzo (-3,35 mm)Gráfico 12 – Teor de Al₂O₃ no quartzo (+3,35 mm)Gráfico 13 – Teor de Al₂O₃ no quartzo (-3,35 mm)

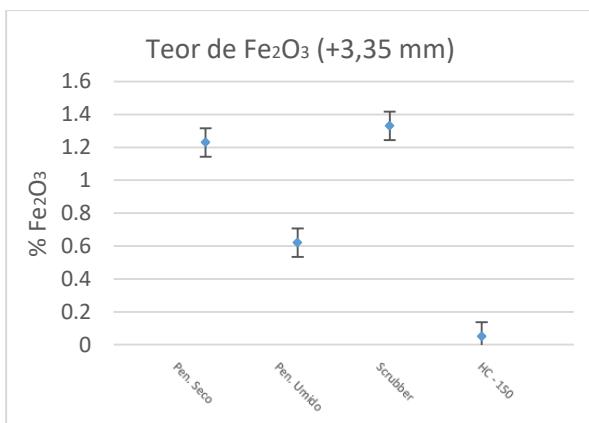
Gráfico 14 – Teor de Fe₂O₃ no quartzo (+3,35 mm)Gráfico 15 – Teor de Fe₂O₃ no quartzo (-3,35 mm)

Tabela 16 – Desempenho dos ensaios para o quartzo

ENSAIOS	Recuperação para os finos (-3,35 mm)		Recuperação em massa para os finos (-3,35 mm)
	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	
Peneiramento a Seco	1,1%	0,6%	0,2%
Peneiramento a úmido	63,5%	3,8%	1,0%
Scrubber	36,7%	7,4%	4,4%
Hydro-Clean	75,7%	84,3%	34,9%

Fonte: Elaborado pelo autor

A granulometria de corte adotada para as análises químicas foi em 3,35 mm, afim de se estabelecer uma comparação mais próxima possível da especificação do quartzo utilizado pela empresa RIMA. Na tabela 18, temos a especificação dos finos que são aceitos e a granulometria de corte em 6,35 mm.

Tabela 17 – Especificação do teor de Al₂O₃ e Fe₂O₃ da empresa RIMA

Fração	Teores	
	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃
+ 6,35 mm	0,17%	0,78%
- 6,35 mm	0,70%	1,38%

Fonte: Grupo Rima

Ao se fazer o corte em 3,35 mm nota-se uma diferença significativa na quantidade de fração passante entre os ensaios, principalmente no *Hydro-Clean* onde as partículas se concentraram mais. Analisando a recuperação dos finos de Al_2O_3 e Fe_2O_3 pôde-se observar que o *Hydro-Clean* obteve resultados bem consideráveis, porém a custos da fragmentação de suas partículas. Infelizmente, a análise química do peneiramento a úmido apresentou um resultado anômalo, sendo assim, foi necessário recalcular os teores da fração abaixo de 3,35 mm. O teor de Al_2O_3 e Fe_2O_3 aceito no retido é de no máximo 0,17% e 0,78%, respectivamente. Analisando a fração retida dos ensaios, observamos que no ensaio com scrubber, obteve-se teor de 0,12% de Al_2O_3 e 1,33% de Fe_2O_3 , enquanto que no *Hydro-Clean* o teor obtido foi de 0,10% de Al_2O_3 e 0,05% de Fe_2O_3 . Comparando com a especificação da empresa RIMA, pôde-se perceber que o ensaio de lavagem com o *Hydro-Clean* foi o único que satisfez os teores exigidos. No scrubber o teor de Fe_2O_3 retido foi 0,10% acima do teor do peneiramento a seco, isso se deve, muito provavelmente a alta variabilidade da amostra ao se realizar o quarteamento, onde a presença de um grão foi capaz de causar uma distorção dos teores químicos.

5. CONCLUSÃO

O presente trabalho apresentou uma revisão bibliográfica à cerca dos principais equipamentos, dentre esses foram realizados ensaios com *Hydro-Clean*, *scrubber*, peneiramento a seco e a úmido. Em linhas gerais, os resultados indicaram em uma mesma tendência, mesmo apresentando alguns desvios na análise química do quartzo no peneiramento a úmido mas que não comprometeram o resultado final.

A areia e a dolomita obtiveram melhor desempenho na eliminação de finos por meio das lavagens com *scrubber* e *Hydro-Clean*, em ambos as recuperações de finos de Al_2O_3 e Fe_2O_3 foram superiores ao demais ensaios. Para a areia a recuperação de finos ficou em torno de 50 %, enquanto que na dolomita foi superior a 76 %. Nota-se que para a dolomita, o ensaio de peneiramento a úmido foi bastante eficaz na eliminação de finos, pelo fato de estarem ligadas fracamente a dolomita, ao contrário da areia, que apresentava maior aglomeração de finos, necessitando de uma desagregação.

O quartzo apresentou bom desempenho na eliminação dos finos por meio das lavagens com o *scrubber* e o *Hydro-Clean*. Era esperado que o *scrubber* apresentasse um desempenho melhor na eliminação de Fe_2O_3 , porém isso não foi observado na análise química. Sendo que o seu teor de Fe_2O_3 da fração retida ficou acima que a do peneiramento a seco, provavelmente ocasionado pela alta variabilidade da amostra ao se fazer o quarteamento.

O *scrubber* apresentou resultados satisfatórios na remoção de finos, aproximando-se bastante do desempenho do *Hydro-Clean*, porém dependendo da especificação final do produto, o *scrubber* pode não ser capaz de atender a especificação do teor de finos, como por exemplo no caso do quartzo utilizado pela empresa RIMA.

O equipamento de lavagem *Hydro-Clean* se mostrou bastante eficiente na remoção de finos, com recuperação superior de finos (Al_2O_3 e Fe_2O_3) do que nos demais ensaios. Porém, essa boa eficiência de lavagem vem acompanhado inherentemente da quebra das partículas e com uma consequente perda de material, caso não seja recuperado.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ABDALLAH, S. **Projeto Quartzo industrial Dueré-Cristalândia (TO)**. CPRM - Serviço Geológico do Brasil, Goiânia, 2010, 59 p.
- ANDRADE, V. L. L.; SOUSA, DRUMMOND, M. A. R.; ARAUJO, F. G. S. **Curso de mineração Básico** - Módulo III: Beneficiamento mineral. Vale, 2007, p.69.
- BARBOSA, Marília Inês Mendes; PORPHÍRIO, Ney Hamilton. **Caracterização Tecnológica de Lascas de Quartzo**, Rio de Janeiro: Cetem - Centro de Tecnologia Mineral, 1995, 53 p.
- CHAVES, A. P. **Teoria e prática do tratamento de minérios**. 2^a ed. São Paulo: Signus Editora, 2002, 267 p. v.1
- COSTA, J. H. B. **Modelagem matemática da operação de escrubagem da bauxita de Paragominas - PA**. Tese (Doutorado) - Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2010, 136 p.
- GUZZO, Pedro Luiz. Quartzo. In: LUZ, Adão Benvindo da; LINS, Fernando Antonio Freitas (Ed.). **Rochas e minerais industriais: Usos e especificações**. 2. ed. Rio de Janeiro: Cetem-mct, 2008. Cap. 31. 681-721 p.
- LOBATO, E. **Perfil do Quartzo**. A Mineração Brasileira. Relatório Técnico 37. 2009, 32 p.
- LUZ A. B.; ALMEIDA S. L. M.; CHAVES, P. C.; WHITAKER, W. **Manual de agregados para construção civil**. Rio de Janeiro, Brasil, 2^a ed. cap. 11. 2012, 197-208 p.
- LUZ, A. B. da; LINS, F. A. F. **Areia Industrial**. Rio de Janeiro: CETEM, 2008. Disponível em <<http://www.cetem.gov.br/publicacao/CTs/CT2008-157-00.pdf>>. Acesso em 24 out. 2019.
- METSO MINERALS. **Manual de britagem**. 6^a ed. Sorocaba: 2005a, 6-18 p.
- MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA - MME. Relatório técnico 31 - **Agregados para construção civil**. Secretaria de Geologia, Mineração e Transformação Mineral - SGM. Disponível em:
<http://www.mme.gov.br/documents/1138775/1256650/P22_RT31_Perfil_de_areia_para_construcao_civil.pdf/9745127c-6fdc-4b9f-9eda-13fa0146d27d>. Acesso em: 08 set. 2019
- MORI, V. **Metalurgia do silício**: processos de obtenção e impactos ambientais. Série Tecnologia Mineral, 41, CETEM/MCT, Rio de Janeiro RJ, Brasil, 2007.
- PALOMBO, S.; VARELA, J. **High pressure washing technology Hydro-Clean - Tailing and Mine Waste** 08, Taylor & Francis Group, London.
- PAZ, S. P. A. **Desenvolvimento e otimização de método de controle de qualidade e processos de beneficiamento para bauxita gibbsíticas tipo Paragominas**. Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2016, 205 p.

PERES, A. E. C.; SALUM, M. J. G.; VALADÃO, G. E. S.; ARAÚJO, A. C. **Métodos de Concentração**. Introdução ao Tratamento de Minérios. Belo Horizonte: Editora UFMG, 2007, 105-139 p.

PETRUCCI, E. G. R.; PAULON, V. A. **Concreto de cimento portland**. São Paulo, Editora Globo, ed. 13^a, 1995

PORPHÍRIO, N. H.; BARBOSA, M. I. M.; BERTOLINO, L. C. **Caracterização mineralógica de minérios**. Rio de Janeiro: CETEM, 2010. Disponível: <<http://mineralis.cetem.gov.br/bitstream/cetem/726/1/CCL00240010.pdf>>. Acesso em 17 set. 2019

SAMPAIO, J. A.; ALMEIDA, S. L. M. DE. **Calcário e Dolomito**. Rochas e Minerais Industriais, Cap 16, 2008, 363–391 p.

SAMPAIO, J. A.; FRANÇA, S. C. A.; BRAGA, P. F. A.; OLIVEIRA, M. L. M.; AQUINO, J. A. **Tratamento de minérios**: Práticas laboratoriais - Amostragem, Rio de Janeiro, Brasil: CETEM-MCT. 2007, 3-13 p.

SAMPAIO, J. A.; FRANÇA, S. C. A.; BRAGA, P. F. A.; SILVA, F. A. N. G. **Tratamento de minérios**: Práticas laboratoriais - Análise Granulométrica por Peneiramento, Rio de Janeiro, Brasil: CETEM-MCT. 13-55 p.

SANTOS, P. S. **Tecnologia de argilas, aplicada às argilas brasileiras**. São Paulo, Edgard Blücher, Ed. Da Universidade de São Paulo, 1975.

TAGGART, A.F. **Handbook of mineral dressing**. New York, USA: John Wiley & Sons, 1945. v.1, 1-16 p.

TRAJANO, R. B. **Princípios de tratamento de minérios**: operações unitárias e aparelhos. Rio de Janeiro, 1966. p. 62-63.

WHITAKER, W. **Técnicas de preparação de areia para uso na construção civil**.. Dissertação (Mestrado) - Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2001, 202 p.

YOUNG, C. A.; KAWATRA, K. S.; DUNNE, R. C. **SME Mineral Processing & Extractive Metallurgy Handbook**, v.1, Colorado, Ed. Society for Mining, Metallurgy & Exploration, 2019

APÊNDICE A

Areia

Tabela 18: Análise granulométrica da areia após o ensaio de peneiramento a seco

Peneiramento a seco				
Massa Inicial (g)	523,61	Massa Final (g)	520,80	
Abertura (mm)	Peso retido (g)	Peso retido (%)	Passante acumulado (%)	Retido acumulado (%)
+12,6	87,15	16,73	83,27	16,73
-12,6 +6,3	230,46	44,25	39,01	60,99
-6,3 +3,35	72,58	13,94	25,08	74,92
-3,35 +1,7	39,80	7,64	17,44	82,56
-1,7 +0,850	24,55	4,71	12,72	87,28
-0,850 +0,425	17,63	3,39	9,34	90,66
-0,425 +0,212	13,99	2,69	6,65	93,35
-0,212 +0,106	14,53	2,79	3,86	96,14
-0,106	20,11	3,86	0,00	100,00
Total	520,80	100,00	Perdas (%)	0,54

Tabela 19: Análise granulométrica da areia após o ensaio de peneiramento a úmido

Peneiramento a úmido				
Massa Inicial (g)	526,27	Massa Final (g)	510,54	
Abertura (mm)	Peso retido (g)	Peso retido (%)	Passante acumulado (%)	Retido acumulado (%)
+12,6	34,05	6,67	93,33	6,67
-12,6 +6,3	60,51	11,85	81,48	18,52
-6,3 +3,35	35,42	6,94	74,54	25,46
-3,35 +1,7	46,96	9,20	65,34	34,66
-1,7 +0,850	55,11	10,79	54,55	45,45
-0,850 +0,425	59,88	11,73	42,82	57,18
-0,425 +0,212	53,90	10,56	32,26	67,74
-0,212 +0,106	52,08	10,20	22,06	77,94
-0,106	112,63	22,06	0,00	100,00
Total	510,54	100,00	Perdas (%)	2,99

Tabela 20: Análise granulométrica da areia após o ensaio de lavagem no *scrubber*

Scrubber				
Massa Inicial (g)	522,43	Massa Final (g)	483,57	
Abertura (mm)	Peso retido (g)	Peso retido (%)	Passante acumulado (%)	Retido acumulado (%)
+12,6	50,39	10,42	89,58	10,42
-12,6 +6,3	49,99	10,34	79,24	20,76
-6,3 +3,35	15,52	3,21	76,03	23,97
-3,35 +1,7	12,59	2,60	73,43	26,57
-1,7 +0,850	14,60	3,02	70,41	29,59
-0,850 +0,425	28,88	5,97	64,44	35,56
-0,425 +0,212	56,35	11,65	52,78	47,22
-0,212 +0,106	81,99	16,96	35,83	64,17
-0,106	173,26	35,83	0,00	100,00
Total	483,57	100,00	Perdas (%)	7,44

Tabela 21: Análise granulométrica da areia após o ensaio de lavagem no *Hydro-Clean* com potência de 50 bar

Hydro-Clean 50 bar				
Massa Inicial (g)	504,5	Massa Final (g)	443,49	
Abertura (mm)	Peso retido (g)	Peso retido (%)	Passante acumulado (%)	Retido acumulado (%)
+12,6	14,90	3,36	96,64	3,36
-12,6 +6,3	28,49	6,42	90,22	9,78
-6,3 +3,35	15,24	3,44	86,78	13,22
-3,35 +1,7	19,15	4,32	82,46	17,54
-1,7 +0,850	36,90	8,32	74,14	25,86
-0,850 +0,425	83,14	18,75	55,39	44,61
-0,425 +0,212	36,19	8,16	47,23	52,77
-0,212 +0,106	66,98	15,10	32,13	67,87
-0,106	142,50	32,13	0,00	100,00
Total	443,49	100,00	Perdas (%)	12,09

Tabela 22: Análise granulométrica da areia após o ensaio de lavagem no *Hydro-Clean* com potência de 105 bar

Hydro-Clean 105 bar				
Massa Inicial (g)	516,35	Massa Final (g)	457,40	
Abertura (mm)	Peso retido (g)	Peso retido (%)	Passante acumulado (%)	Retido acumulado (%)
+12,6	10,89	2,38	97,62	2,38
-12,6 +6,3	25,79	5,64	92,98	8,02
-6,3 +3,35	18,71	4,09	87,89	12,11
-3,35 +1,7	21,17	4,63	83,26	16,74
-1,7 +0,850	43,24	9,45	73,81	26,19
-0,850 +0,425	99,74	21,81	52,00	48,00
-0,425 +0,212	32,24	7,05	44,95	55,05
-0,212 +0,106	56,99	12,46	32,49	67,51
-0,106	148,63	32,49	0,00	100,00
Total	457,40	100,00	Perdas (%)	11,42

Tabela 23: Análise granulométrica da areia após o ensaio de lavagem no *Hydro-Clean* com potência de 150 bar

Hydro-Clean 150 bar				
Massa Inicial (g)	518,01	Massa Final (g)	444,49	
Abertura (mm)	Peso retido (g)	Peso retido (%)	Passante acumulado (%)	Retido acumulado (%)
+12,6	19,31	4,34	95,66	4,34
-12,6 +6,3	33,65	7,57	88,09	11,91
-6,3 +3,35	11,59	2,61	85,48	14,52
-3,35 +1,7	13,40	3,01	82,46	17,54
-1,7 +0,850	33,67	7,57	74,89	25,11
-0,850 +0,425	48,53	10,92	63,97	36,03
-0,425 +0,212	51,28	11,54	52,43	47,57
-0,212 +0,106	55,46	12,48	39,96	60,04
-0,106	177,60	39,96	0,00	100,00
Total	444,49	100,00	Perdas (%)	14,19

Dolomita

Tabela 24: Análise granulométrica da dolomita após o ensaio de peneiramento a seco

Peneiramento a seco				
Massa Inicial (g)	518,57	Massa Final (g)	516,95	
Abertura (mm)	Peso retido (g)	Peso retido (%)	Passante acumulado (%)	Retido acumulado (%)
+6,3	39,35	7,61	92,39	7,61
-6,3 +3,35	152,97	29,59	62,80	37,20
-3,35 +1,7	104,89	20,29	42,51	57,49
-1,7 +0,850	66,95	12,95	29,56	70,44
-0,850 +0,425	44,79	8,66	20,89	79,11
-0,425 +0,212	30,15	5,83	15,06	84,94
-0,212 +0,106	23,85	4,61	10,45	89,55
-0,106	54,00	10,45	0,00	100,00
Total	516,95	100,00	Perdas (%)	0,31

Tabela 25: Análise granulométrica da dolomita após o ensaio de peneiramento a úmido

Peneiramento a úmido				
Massa Inicial (g)	534,68	Massa Final (g)	529,05	
Abertura (mm)	Peso retido (g)	Peso retido (%)	Passante acumulado (%)	Retido acumulado (%)
+6,3	48,60	9,19	90,81	9,19
-6,3 +3,35	151,13	28,57	62,25	37,75
-3,35 +1,7	100,98	19,09	43,16	56,84
-1,7 +0,850	61,35	11,60	31,56	68,44
-0,850 +0,425	34,45	6,51	25,05	74,95
-0,425 +0,212	26,09	4,93	20,12	79,88
-0,212 +0,106	15,82	2,99	17,13	82,87
-0,106	90,63	17,13	0,00	100,00
Total	529,05	100,00	Perdas (%)	1,05

Tabela 26: Análise granulométrica da dolomita após o ensaio de lavagem no *scrubber*

Scrubber				
Massa Inicial (g)	547,14	Massa Final (g)	545,10	
Abertura (mm)	Peso retido (g)	Peso retido (%)	Passante acumulado (%)	Retido acumulado (%)
+6,3	82,74	15,18	84,82	15,18
-6,3 +3,35	145,08	26,62	58,21	41,79
-3,35 +1,7	97,99	17,98	40,23	59,77
-1,7 +0,850	52,15	9,57	30,66	69,34
-0,850 +0,425	36,40	6,68	23,98	76,02
-0,425 +0,212	21,34	3,91	20,07	79,93
-0,212 +0,106	17,19	3,15	16,92	83,08
-0,106	92,21	16,92	0,00	100,00
Total	545,10	100,00	Perdas (%)	0,37

Tabela 27: Análise granulométrica da dolomita após o ensaio de lavagem no *Hydro-Clean* com potência de 50 bar

Hydro-Clean 50 bar				
Massa Inicial (g)	519,01	Massa Final (g)	509,84	
Abertura (mm)	Peso retido (g)	Peso retido (%)	Passante acumulado (%)	Retido acumulado (%)
+6,3	32,76	6,43	93,57	6,43
-6,3 +3,35	108,5	21,28	72,29	27,71
-3,35 +1,7	93,78	18,39	53,90	46,10
-1,7 +0,850	76,83	15,07	38,83	61,17
-0,850 +0,425	51,24	10,05	28,78	71,22
-0,425 +0,212	26,75	5,25	23,53	76,47
-0,212 +0,106	22,61	4,43	19,10	80,90
-0,106	97,37	19,10	0,00	100,00
Total	509,84	100,00	Perdas (%)	1,77

Tabela 28: Análise granulométrica da dolomita após o ensaio de lavagem no *Hydro-Clean* com potência de 105 bar

<i>Hydro-Clean 105 bar</i>				
Massa Inicial (g)	516,87	Massa Final (g)	513,31	
Abertura (mm)	Peso retido (g)	Peso retido (%)	Passante acumulado (%)	Retido acumulado (%)
+6,3	41,35	8,06	91,94	8,06
-6,3 +3,35	112,93	22,00	69,94	30,06
-3,35 +1,7	100,30	19,54	50,40	49,60
-1,7 +0,850	80,67	15,72	34,69	65,31
-0,850 +0,425	30,18	5,88	28,81	71,19
-0,425 +0,212	39,98	7,79	21,02	78,98
-0,212 +0,106	16,67	3,25	17,77	82,23
-0,106	91,23	17,77	0,00	100,00
Total	513,31	100,00	Perdas (%)	0,69

Tabela 29: Análise granulométrica da dolomita após o ensaio de lavagem no *Hydro-Clean* com potência de 150bar

<i>Hydro-Clean 150 bar</i>				
Massa Inicial (g)	533,91	Massa Final (g)	529,63	
Abertura (mm)	Peso retido (g)	Peso retido (%)	Passante acumulado (%)	Retido acumulado (%)
+6,3	28,40	5,36	94,64	5,36
-6,3 +3,35	102,73	19,40	75,24	24,76
-3,35 +1,7	98,76	18,65	56,59	43,41
-1,7 +0,850	83,14	15,70	40,90	59,10
-0,850 +0,425	55,82	10,54	30,36	69,64
-0,425 +0,212	33,29	6,29	24,07	75,93
-0,212 +0,106	24,83	4,69	19,38	80,62
-0,106	102,66	19,38	0,00	100,00
Total	529,63	100,00	Perdas (%)	0,80

Quartzo

Tabela 30: Análise granulométrica do quartzo após o ensaio de peneiramento a seco

Peneiramento a seco				
Massa Inicial (g)	518,57	Massa Final (g)	511,63	
Abertura (mm)	Peso retido (g)	Peso retido (%)	Passante acumulado (%)	Retido acumulado (%)
+19,0	92,50	18,08	81,92	18,08
-19,0 +16,0	156,18	30,53	51,39	48,61
-16,0 +9,5	242,82	47,46	3,93	96,07
-9,5 +3,35	18,97	3,71	0,23	99,77
-3,35 +1,18	0,31	0,06	0,17	99,83
-1,18 +0,425	0,43	0,08	0,08	99,92
-0,425 +0,106	0,30	0,06	0,02	99,98
-0,106	0,12	0,02	0,00	100,00
Total	511,63	100,00	Perdas (%)	1,34

Tabela 31: Análise granulométrica do quartzo após o ensaio de peneiramento a úmido

Peneiramento a úmido				
Massa Inicial (g)	514,64	Massa Final (g)	512,64	
Abertura (mm)	Peso retido (g)	Peso retido (%)	Passante acumulado (%)	Retido acumulado (%)
+19,0	137,91	26,90	73,10	26,90
-19,0 +16,0	114,57	22,35	50,75	49,25
-16,0 +9,5	229,68	44,80	5,95	94,05
-9,5 +3,35	25,60	4,99	0,95	99,05
-3,35 +1,18	1,04	0,20	0,75	99,25
-1,18 +0,425	1,28	0,25	0,50	99,50
-0,425 +0,106	0,78	0,15	0,35	99,65
-0,106	1,78	0,35	0,00	100,00
Total	512,64	100,00	Perdas (%)	0,39

Tabela 32: Análise granulométrica do quartzo após o ensaio de lavagem no *scrubber*

Scrubber				
Massa Inicial (g)	518,90	Massa Final (g)	517,17	
Abertura (mm)	Peso retido (g)	Peso retido (%)	Passante acumulado (%)	Retido acumulado (%)
+19,0	74,94	14,49	85,51	14,49
-19,0 +16,0	131,74	25,47	60,04	39,96
-16,0 +9,5	252,44	48,81	11,22	88,78
-9,5 +3,35	35,42	6,85	4,38	95,62
-3,35 +1,18	5,25	1,02	3,36	96,64
-1,18 +0,425	4,52	0,87	2,49	97,51
-0,425 +0,106	6,45	1,25	1,24	98,76
-0,106	6,41	1,24	0,00	100,00
Total	517,17	100	Perdas (%)	0,33

Tabela 33: Análise granulométrica do quartzo após o ensaio de lavagem no *Hydro-Clean* com potência de 50 bar

Hydro-Clean 50 bar				
Massa Inicial (g)	530,01	Massa Final (g)	524,90	
Abertura (mm)	Peso retido (g)	Peso retido (%)	Passante acumulado (%)	Retido acumulado (%)
+19,0	36,10	6,88	93,12	6,88
-19,0 +16,0	94,63	18,03	75,09	24,91
-16,0 +9,5	151,98	28,95	46,14	53,86
-9,5 +3,35	109,78	20,91	25,23	74,77
-3,35 +1,18	56,08	10,68	14,54	85,46
-1,18 +0,425	45,84	8,73	5,81	94,19
-0,425 +0,106	25,11	4,78	1,02	99,98
-0,106	5,38	1,02	0,00	100,00
Total	524,9	100,00	Perdas (%)	0,96

Tabela 34: Análise granulométrica do quartzo após o ensaio de lavagem no *Hydro-Clean* com potência de 105 bar

Hydro-Clean 105 bar				
Massa Inicial (g)	532,64	Massa Final (g)	531,01	
Abertura (mm)	Peso retido (g)	Peso retido (%)	Passante acumulado (%)	Retido acumulado (%)
+19,0	69,21	13,03	86,97	13,03
-19,0 +16,0	58,64	11,04	75,92	24,08
-16,0 +9,5	163,67	30,82	45,10	54,90
-9,5 +3,35	116,97	22,03	23,07	76,93
-3,35 +1,18	50,95	9,59	13,48	86,52
-1,18 +0,425	41,66	7,85	5,63	94,37
-0,425 +0,106	23,92	4,50	1,13	98,87
-0,106	5,99	1,13	0,00	100,00
Total	531,01	100,00	Perdas (%)	0,31

Tabela 35: Análise granulométrica do quartzo após o ensaio de lavagem no *Hydro-Clean* com potência de 150 bar

Hydro-Clean 150 bar				
Massa Inicial (g)	548,06	Massa Final (g)	540,33	
Abertura (mm)	Peso retido (g)	Peso retido (%)	Passante acumulado (%)	Retido acumulado (%)
+19,0	19,84	3,67	96,33	3,67
-19,0 +16,0	65,30	12,09	84,24	15,76
-16,0 +9,5	155,33	28,75	55,50	44,50
-9,5 +3,35	111,31	20,60	34,90	65,10
-3,35 +1,18	73,79	13,66	21,24	78,76
-1,18 +0,425	67,78	12,54	8,69	91,31
-0,425 +0,106	36,65	6,78	1,91	98,09
-0,106	10,33	1,91	0,00	100,00
Total	540,33	100,00	Perdas (%)	1,41

APÊNDICE B

Gráfico 16: Curva granulométrica da areia (completo)

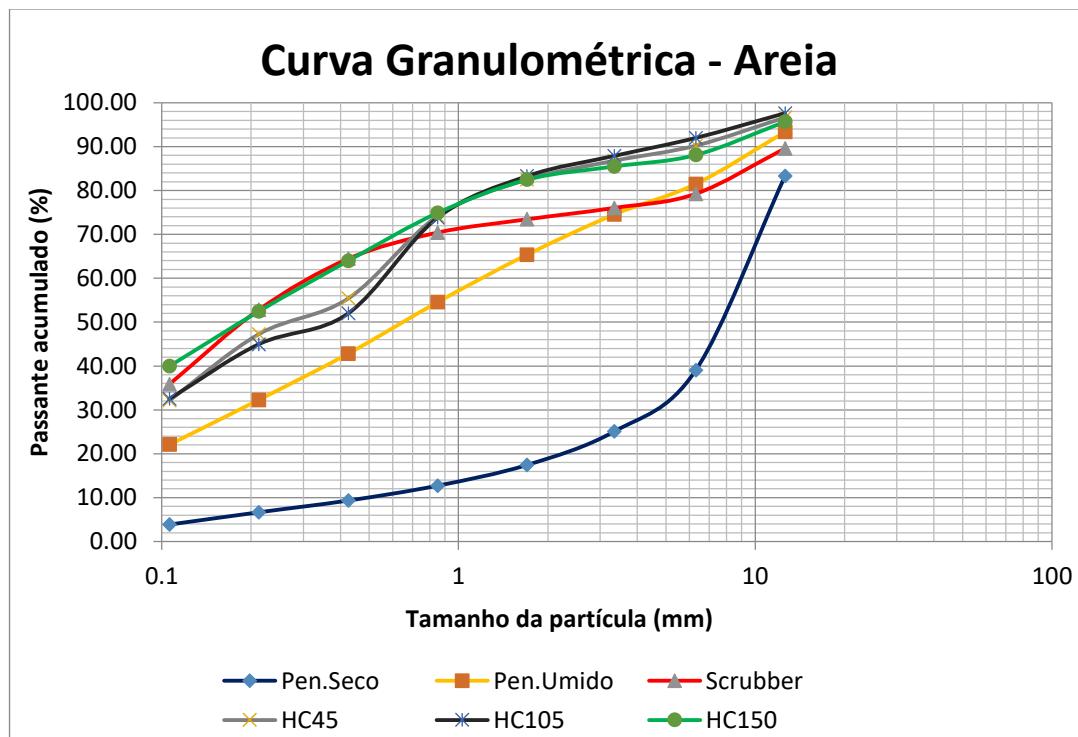


Gráfico 17: Curva granulométrica da dolomita (completo)

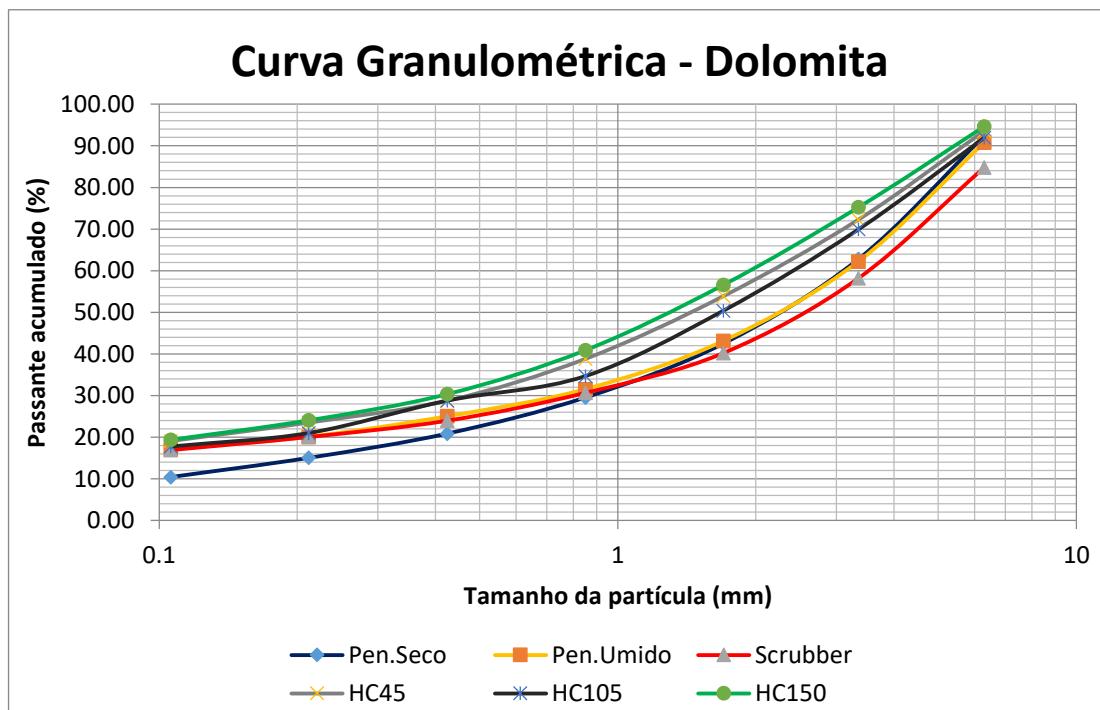
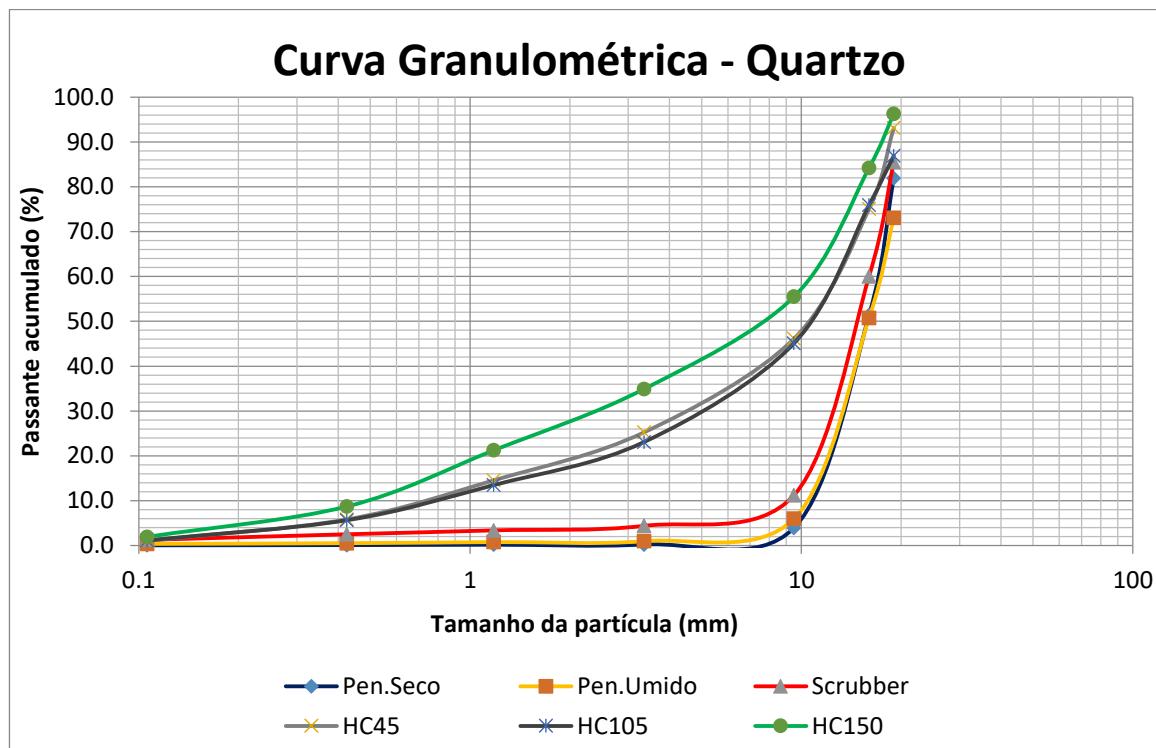


Gráfico 18: Curva granulométrica de quartzo (completo)



APÊNDICE C

Areia

Figura 14: Fração +12,6 mm de areia

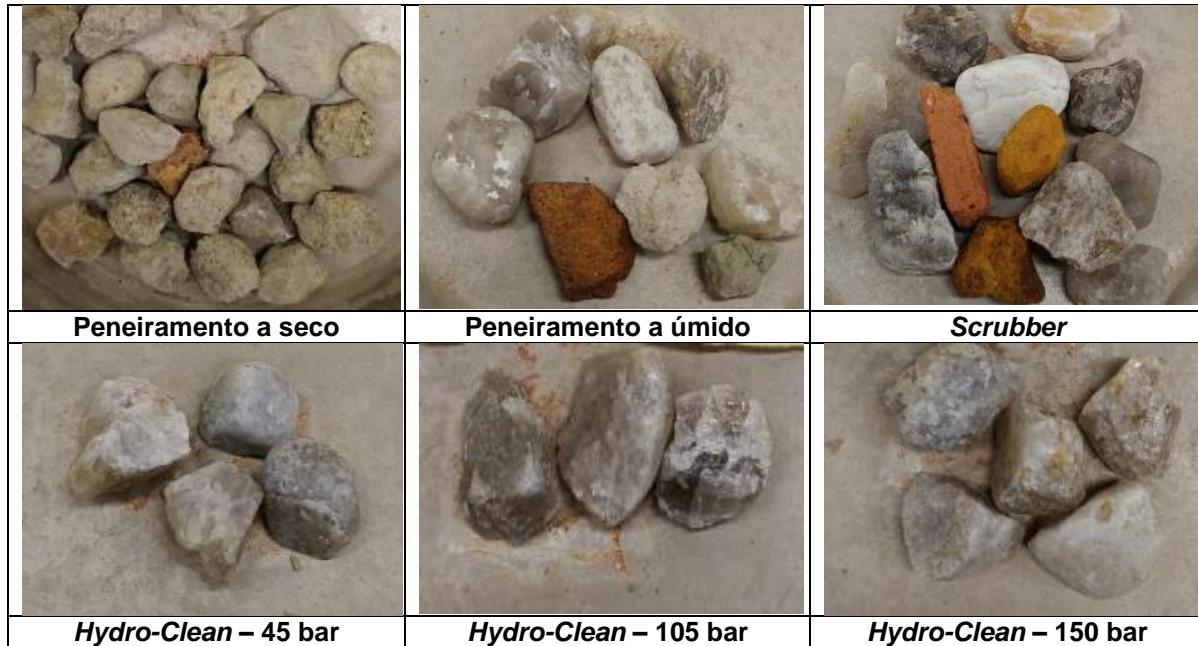


Figura 15: Fração -12,6 +6,30 mm de areia



Figura 16: Fração -6,30 +3,35 mm de areia

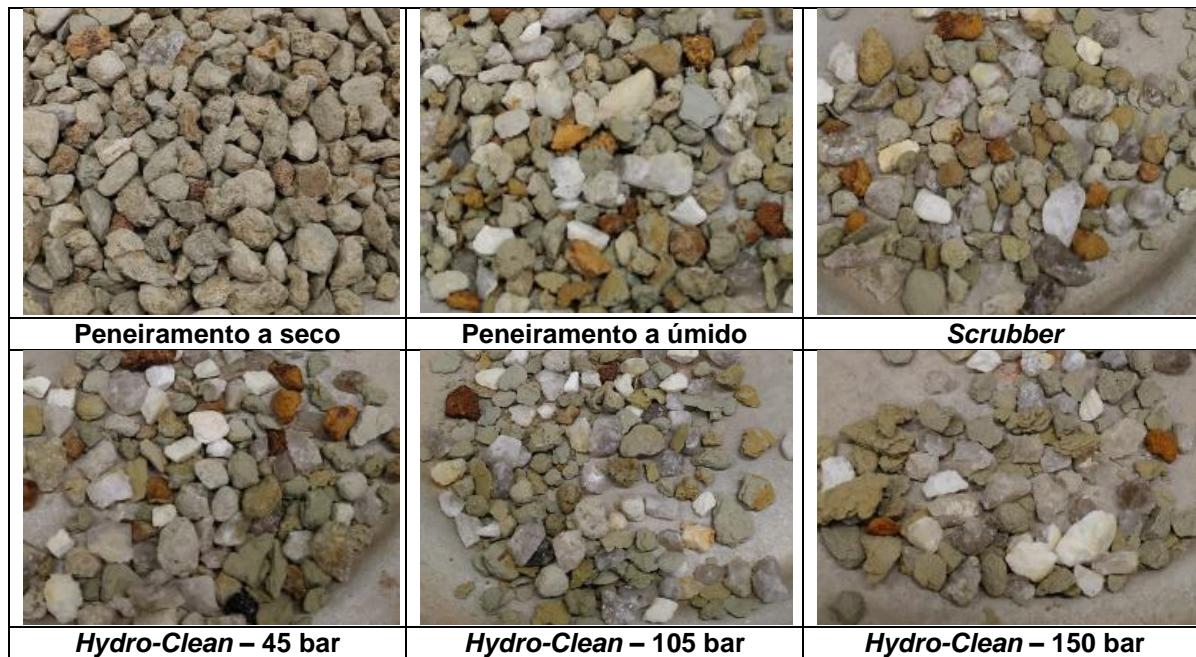


Figura 17: Fração -3,35 +1,70 mm de areia

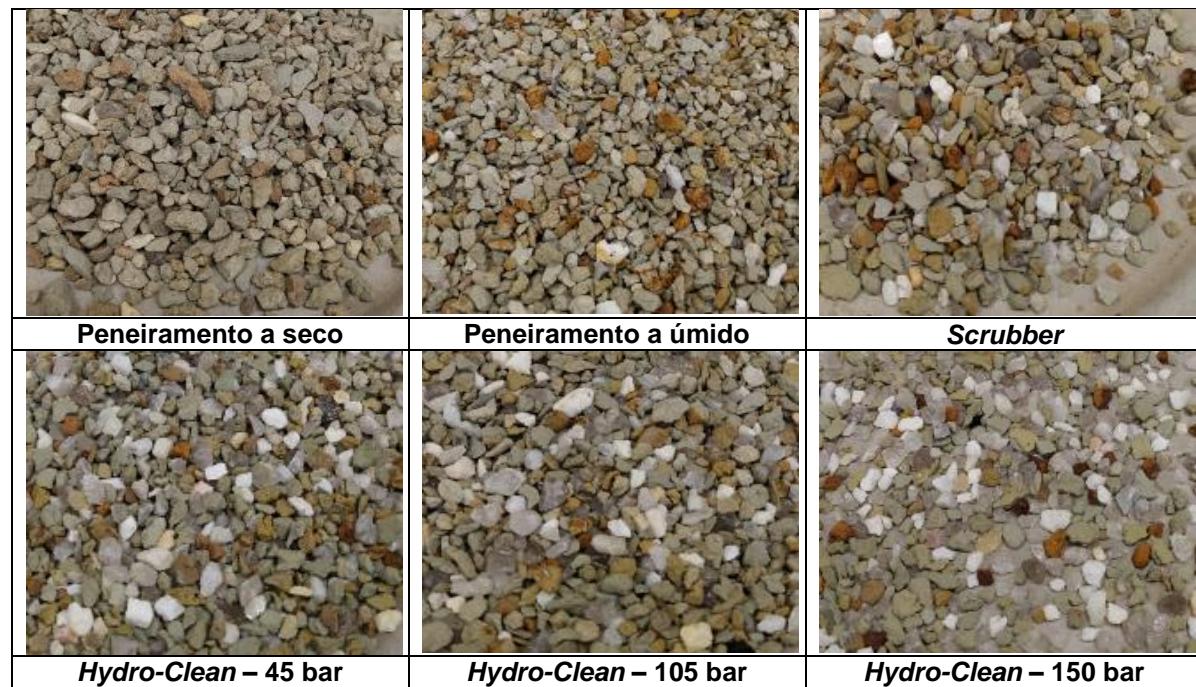


Figura 18: Fração -1,70 +0,850 mm de areia

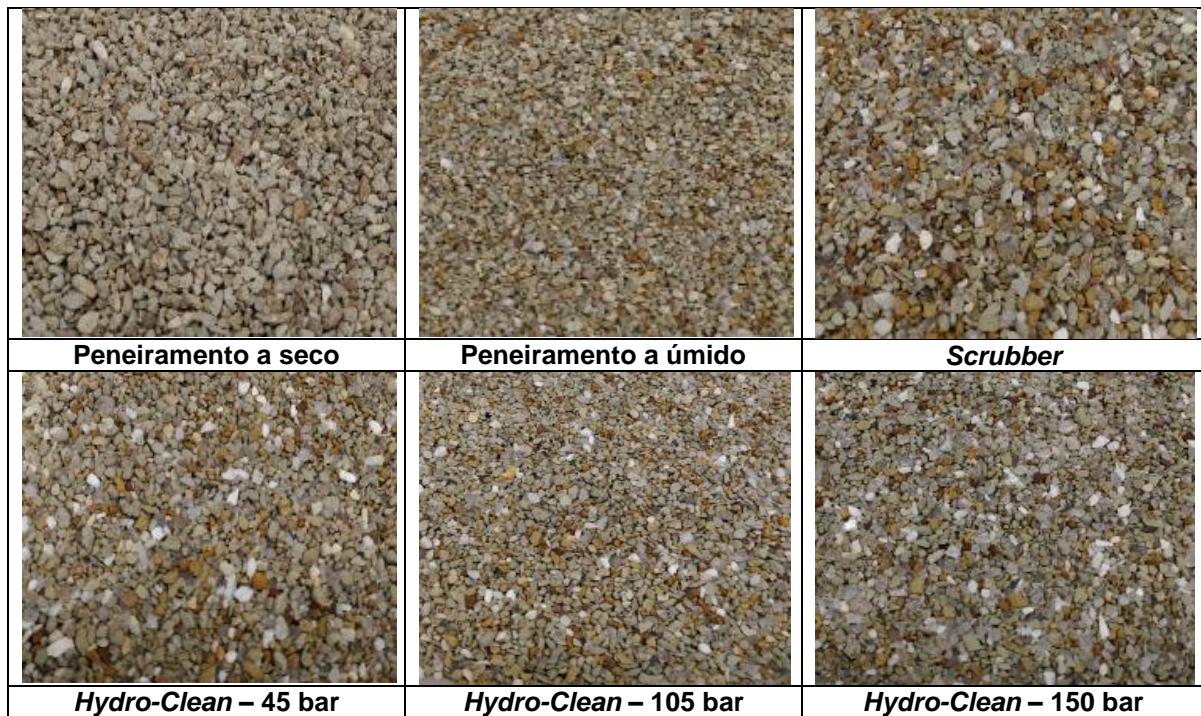


Figura 19: Fração -0,850 +0,425 mm de areia



Figura 20: Fração -0,425 +0,212 mm de areia



Figura 21: Fração -0,212 +0,106 mm de areia

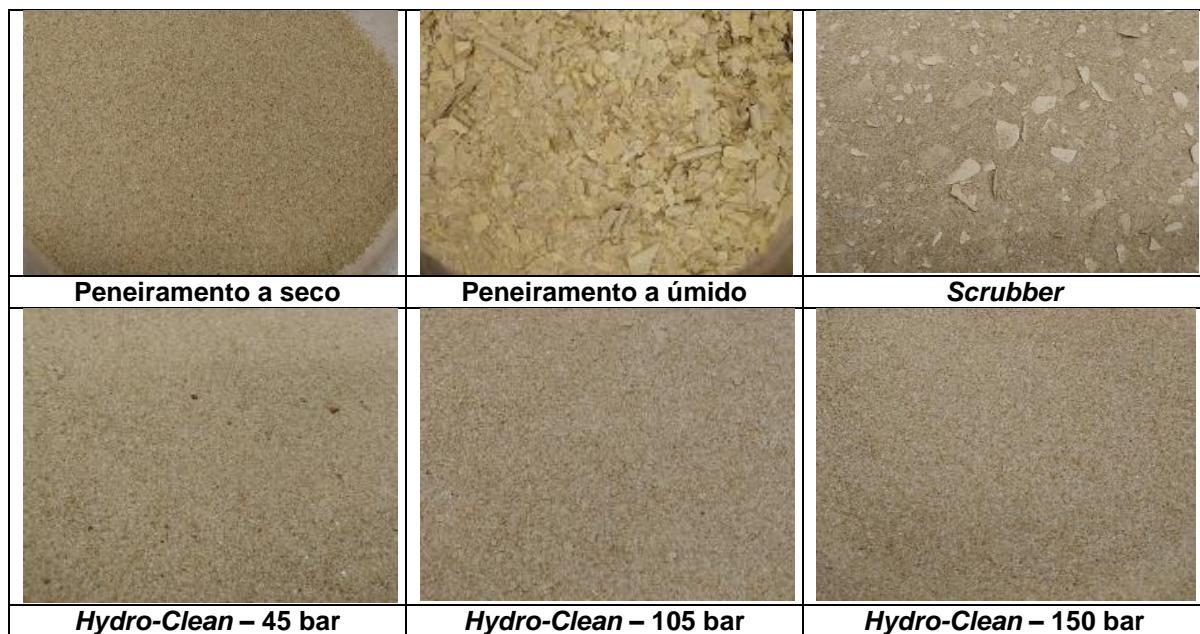
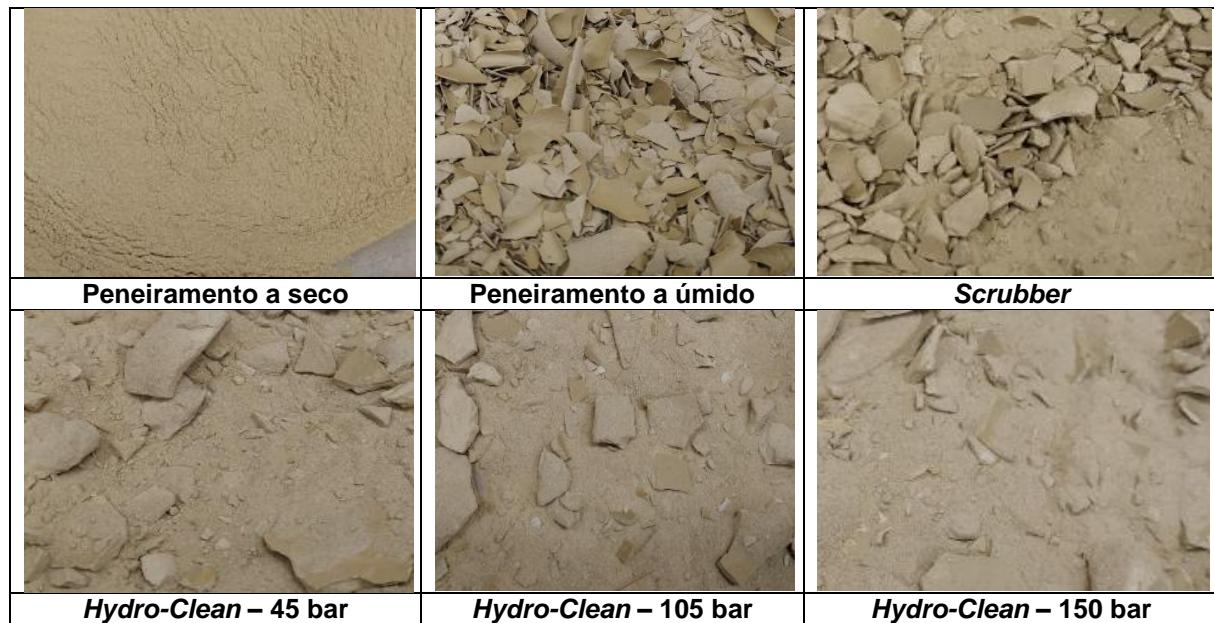


Figura 22: Fração -0,106 mm de areia



Dolomita

Figura 23: Fração +6,30 mm de dolomita



Figura 24: Fração -6,30 +3,35 mm de dolomita

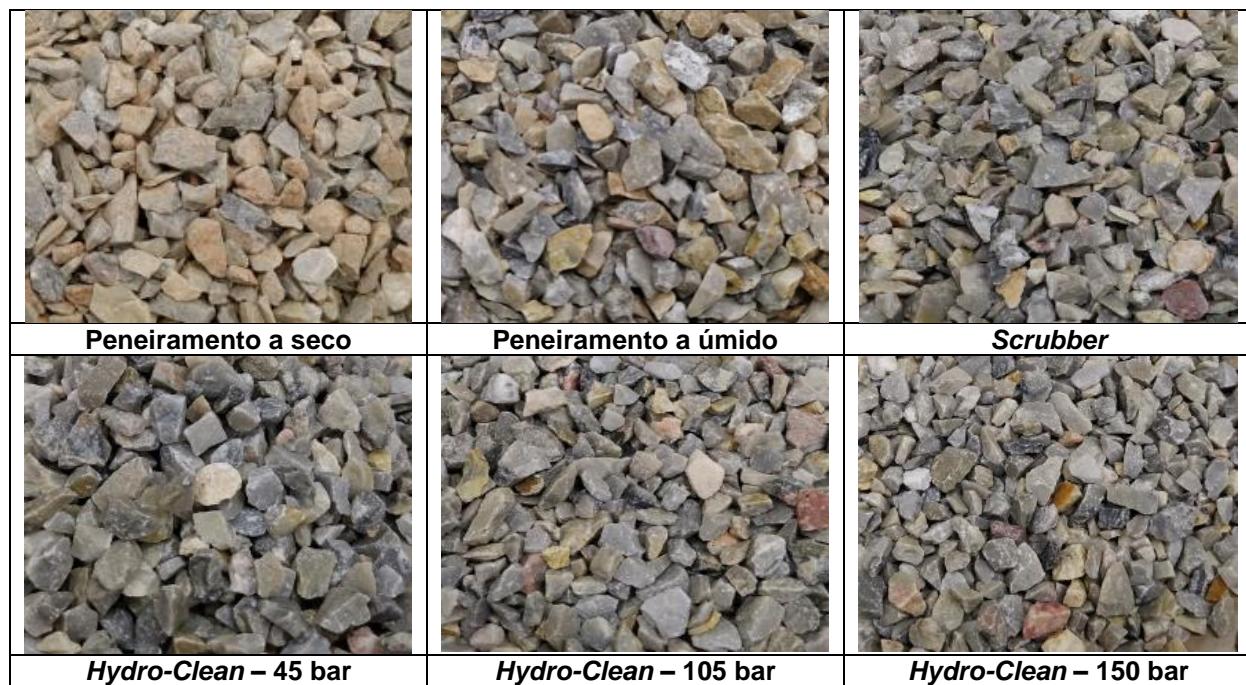


Figura 25: Fração -3,35 +1,70 mm de dolomita



Figura 26: Fração -1,70 +0,850 mm de dolomita

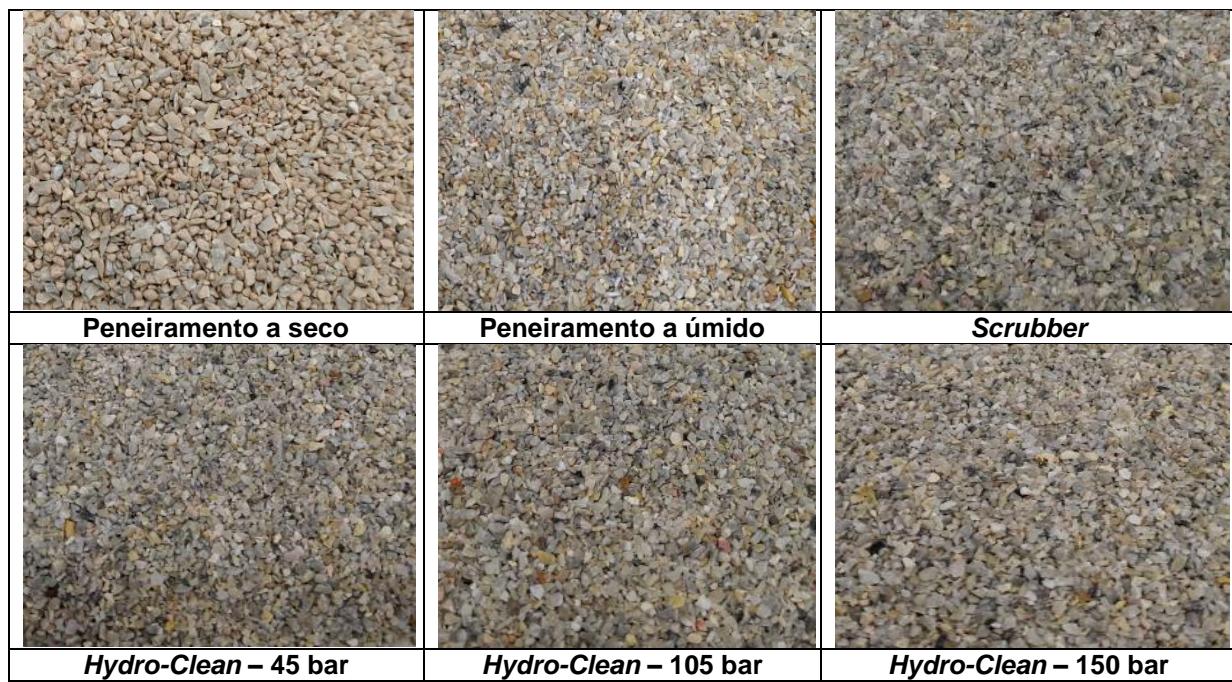


Figura 27: Fração -0,850 +0,425 mm de dolomita



Figura 28: Fração -0,425 +0,212 mm de dolomita

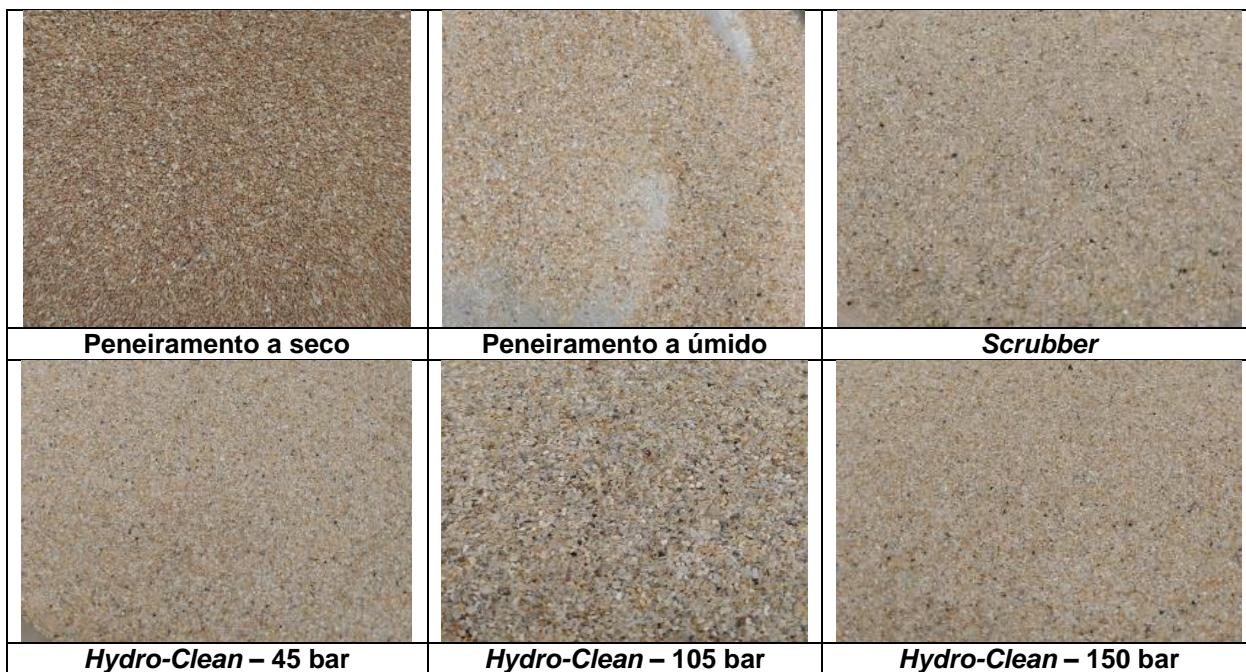


Figura 29: Fração -0,212 +0,106 mm de dolomita



Figura 30: Fração -0,106 mm de dolomita



Quartzo

Figura 31: Fração +19,0 mm de quartzo



Figura 32: Fração -19,0 +16,0 mm de quartzo



Figura 33: Fração -16,0 +9,50 mm de quartzo



Figura 34: Fração -9,5 +3,35 mm de quartzo

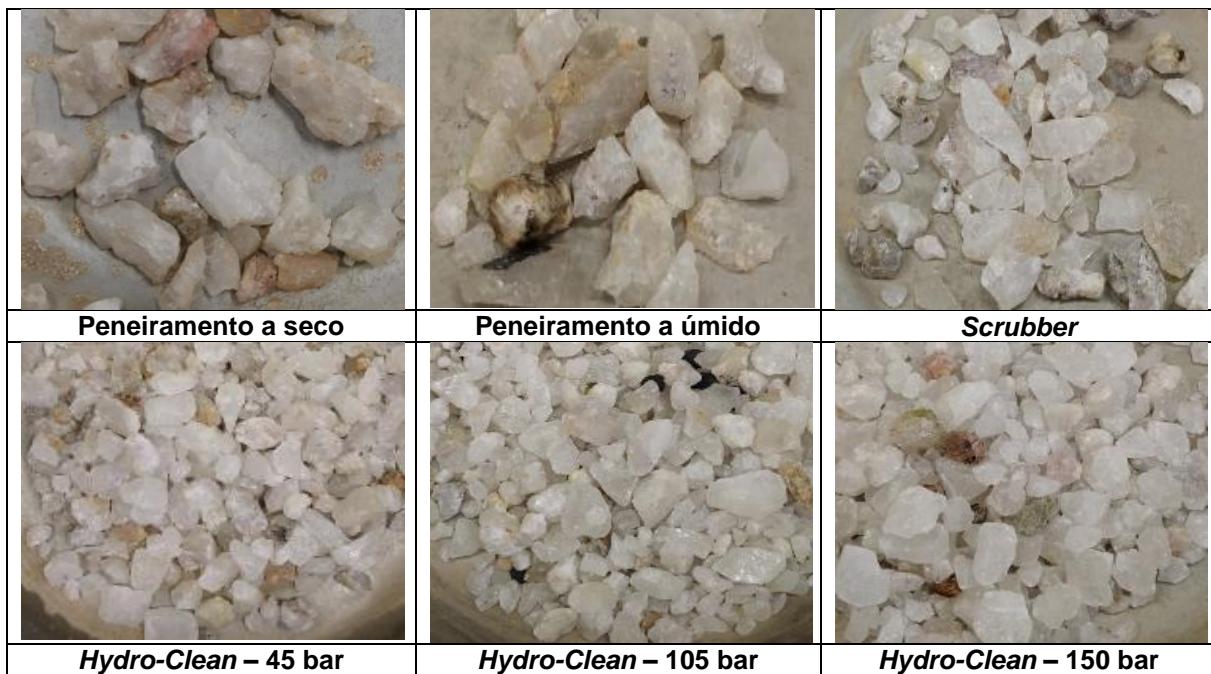


Figura 35: Fração -3,35 +1,18 mm de quartzo

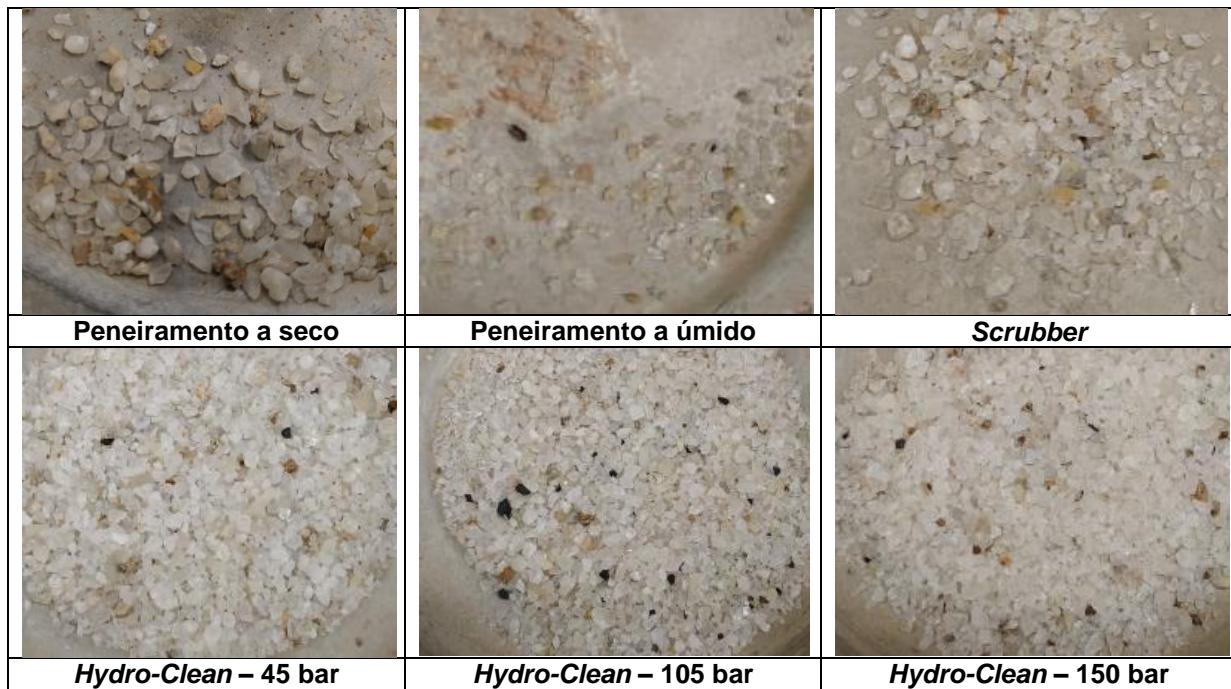


Figura 36: Fração -1,18 +0.425 mm de quartzo

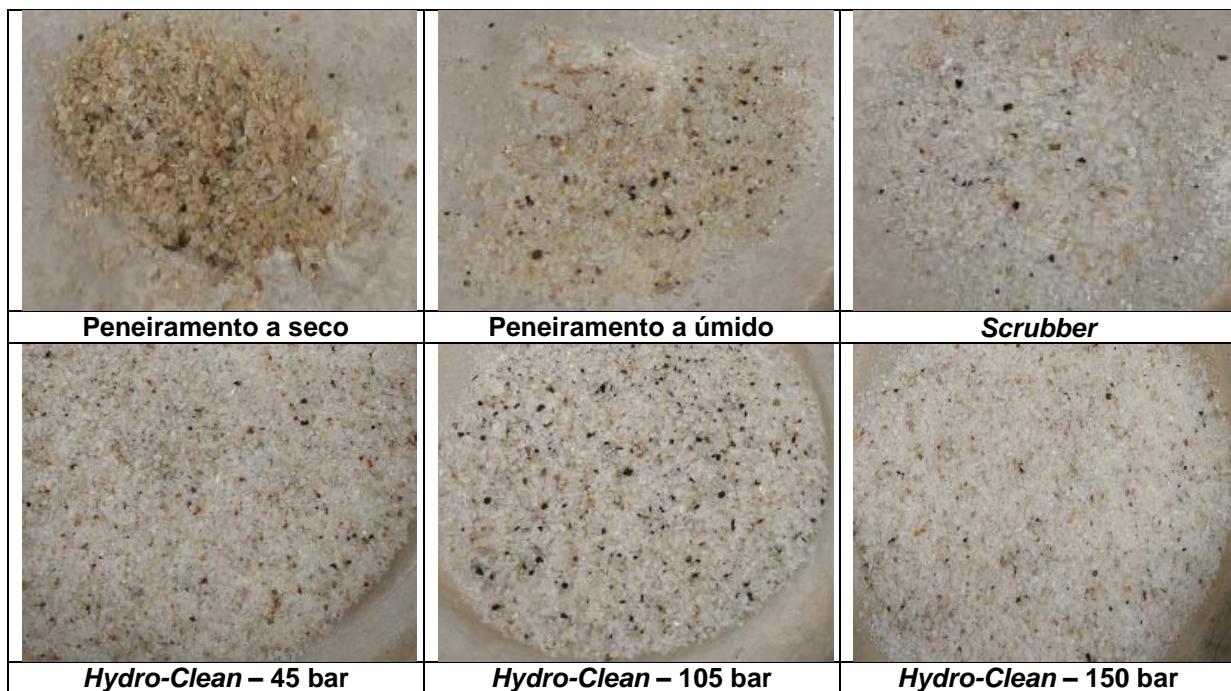
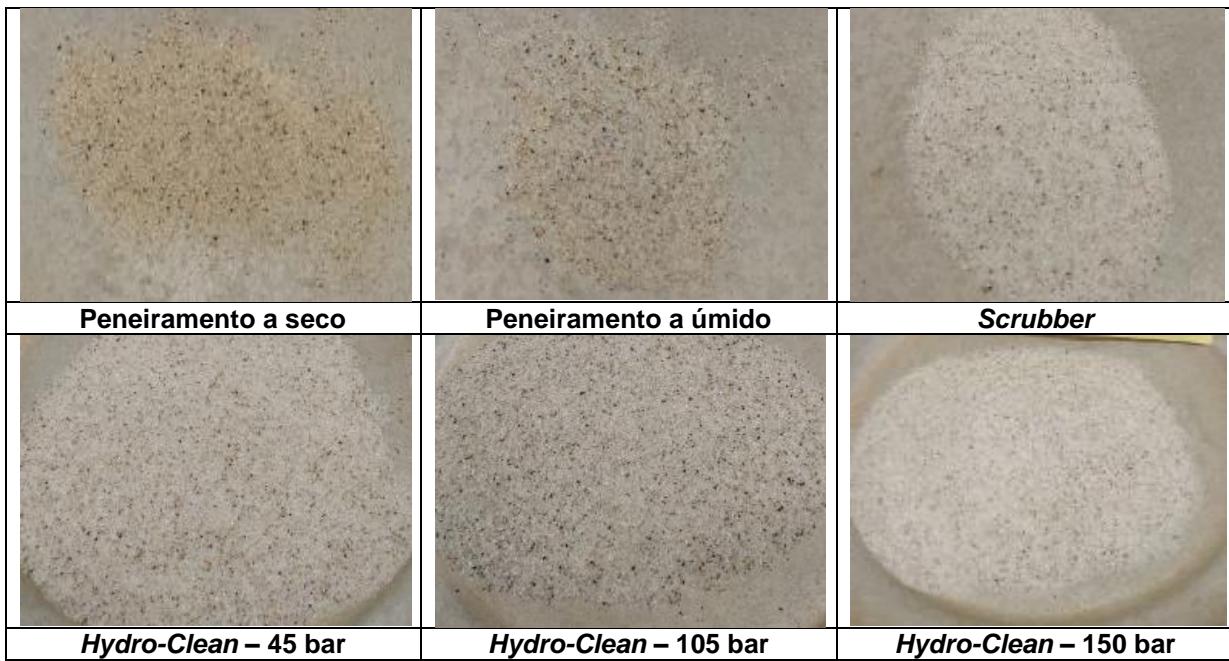


Figura 37: Fração $-0,425 +0,106$ mm de quartzoFigura 38: Fração $-0,106$ mm de quartzo

APÊNDICE D

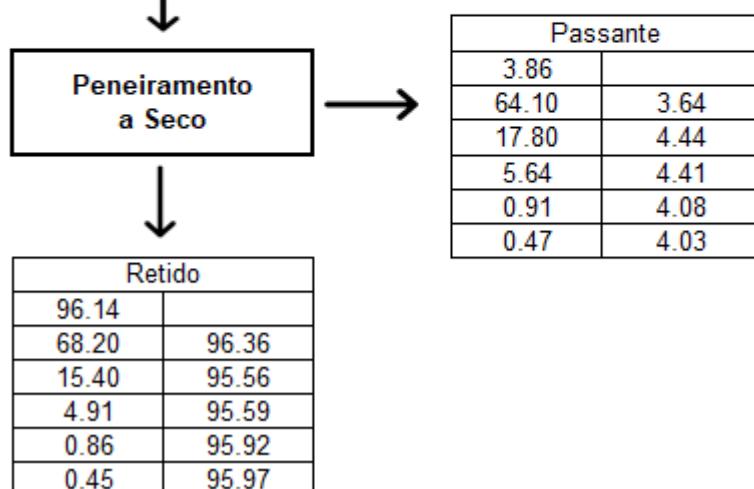
Areia

Balanço metalúrgico do ensaio de peneiramento a seco para amostra de areia:

Produto	Massa (g)	Massa (%)	Teores (%)					Distribuição (%)				
			SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	MgO	CaO	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	MgO	CaO
+ 106 µm	500.69	96.14	68.20	15.40	4.91	0.86	0.45	96.36	95.56	95.59	95.92	95.97
- 106 µm	20.11	3.86	64.10	17.80	5.64	0.91	0.47	3.64	4.44	4.41	4.08	4.03
Alim. Calculada	520.80	100.00	68.04	15.49	4.94	0.86	0.45	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0

Alimentação	
100	40
68.04	100
15.49	100
4.94	100
0.86	100
0.45	100

LEGENDA:	
Produto	
Massa (%)	Sólidos (%)
Teor SiO ₂ (%)	Dist. SiO ₂ (%)
Teor Al ₂ O ₃ (%)	Dist. Al ₂ O ₃ (%)
Teor Fe ₂ O ₃ (%)	Dist. Fe ₂ O ₃ (%)
Teor MgO (%)	Dist. MgO (%)
Teor CaO (%)	Dist. CaO (%)



Balanço metalúrgico do ensaio de lavagem por peneiramento a úmido para amostra de areia:

Produto	Massa (g)	Massa (%)	Teores (%)					Distribuição (%)				
			SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	MgO	CaO	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	MgO	CaO
+ 106 µm	397.91	77.94	70.60	13.50	4.96	0.71	0.38	80.79	70.14	73.00	69.13	70.20
- 106 µm	112.63	22.06	59.30	20.30	6.48	1.12	0.57	19.21	29.86	27.00	30.87	29.80
Alim. Calculada	510.54	100.00	68.11	15.00	5.30	0.80	0.42	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0

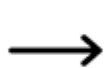
Alimentação	
100	40
68.11	100
15.00	100
5.30	100
0.80	100
0.42	100

LEGENDA:

Produto	
Massa (%)	Sólidos (%)
Teor SiO ₂ (%)	Dist. SiO ₂ (%)
Teor Al ₂ O ₃ (%)	Dist. Al ₂ O ₃ (%)
Teor Fe ₂ O ₃ (%)	Dist. Fe ₂ O ₃ (%)
Teor MgO (%)	Dist. MgO (%)
Teor CaO (%)	Dist. CaO (%)



Peneiramento a úmido	
----------------------	--



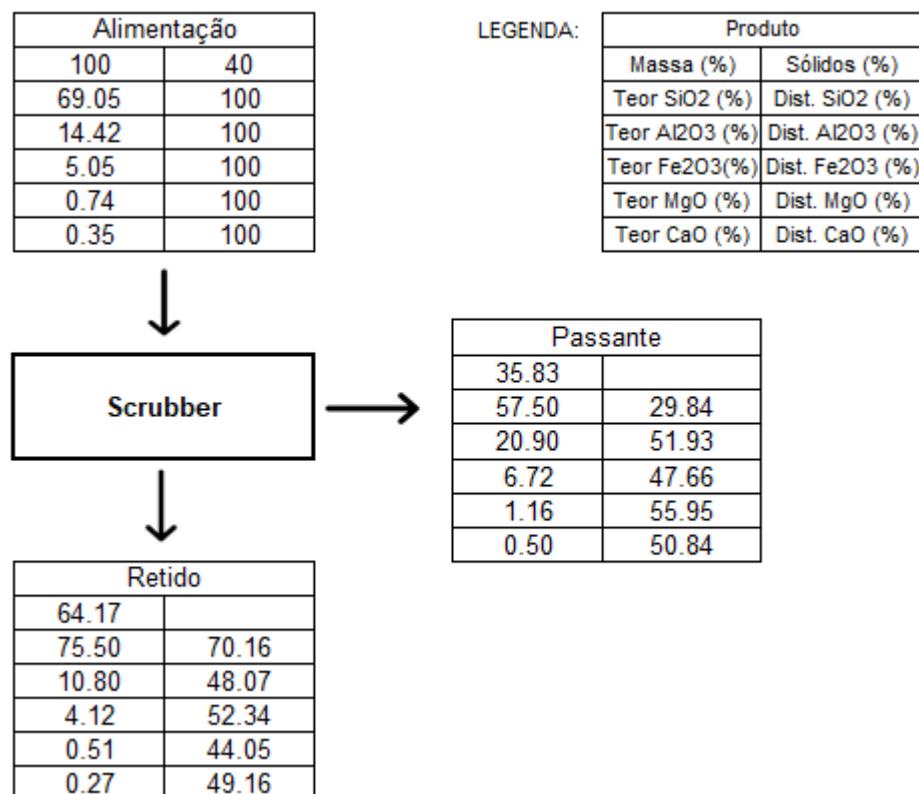
Passante	
22.06	
59.30	19.21
20.30	29.86
6.48	27.00
1.12	30.87
0.57	29.80



Retido	
77.94	
70.60	80.79
13.50	70.14
4.96	73.00
0.71	69.13
0.38	70.20

Balanço metalúrgico do ensaio de lavagem com *scrubber* para amostra de areia:

Produto	Massa (g)	Massa (%)	Teores (%)					Distribuição (%)				
			SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	MgO	CaO	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	MgO	CaO
+ 106 µm	310.31	64.17	75.50	10.80	4.12	0.51	0.27	70.16	48.07	52.34	44.05	49.16
- 106 µm	173.26	35.83	57.50	20.90	6.72	1.16	0.50	29.84	51.93	47.66	55.95	50.84
Alim. Calculada	483.57	100.00	69.05	14.42	5.05	0.74	0.35	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0



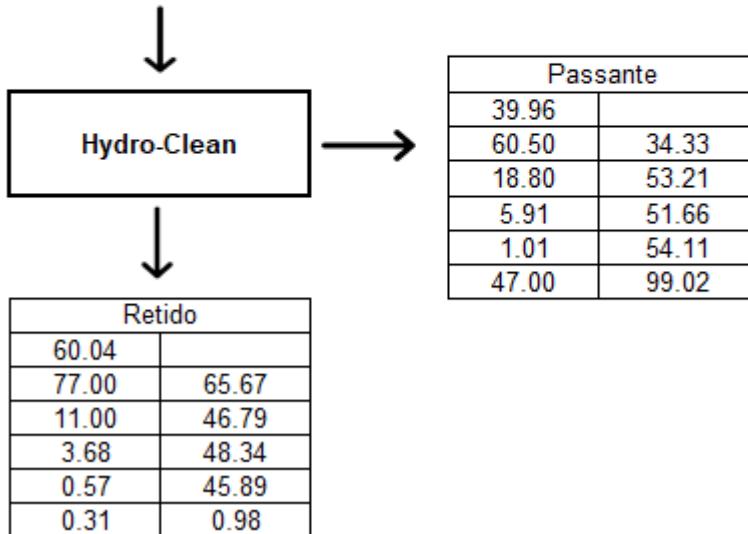
Balanço metalúrgico do ensaio de lavagem com *Hydro-Clean* 150 bar para amostra de areia:

Produto	Massa (g)	Massa (%)	Teores (%)					Distribuição (%)				
			SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	MgO	CaO	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	MgO	CaO
+ 106 µm	266.89	60.04	77.00	11.00	3.68	0.57	0.31	65.67	46.79	48.34	45.89	0.98
- 106 µm	177.60	39.96	60.50	18.80	5.91	1.01	47.00	34.33	53.21	51.66	54.11	99.02
Alim. Calculada	444.49	100.00	70.41	14.12	4.57	0.75	18.97	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0

Alimentação	
100	40
70.41	100
14.12	100
4.57	100
0.75	100
18.97	100

LEGENDA:

Produto	
Massa (%)	Sólidos (%)
Teor SiO ₂ (%)	Dist. SiO ₂ (%)
Teor Al ₂ O ₃ (%)	Dist. Al ₂ O ₃ (%)
Teor Fe ₂ O ₃ (%)	Dist. Fe ₂ O ₃ (%)
Teor MgO (%)	Dist. MgO (%)
Teor CaO (%)	Dist. CaO (%)



Dolomita

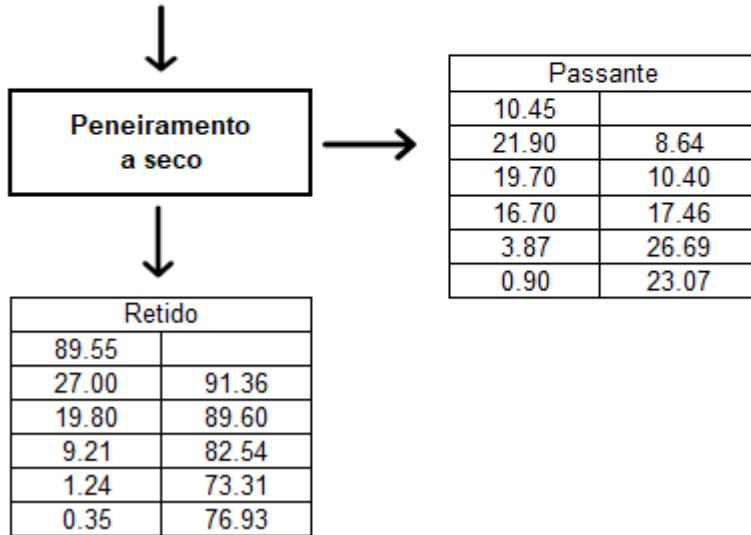
Balanço metalúrgico do ensaio de peneiramento a seco para amostra de dolomita:

Produto	Massa (g)	Massa (%)	Teores (%)					Distribuição (%)				
			CaO	MgO	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃
+ 106 µm	462.95	89.55	27.00	19.80	9.21	1.24	0.35	91.36	89.60	82.54	73.31	76.93
- 106 µm	54.00	10.45	21.90	19.70	16.70	3.87	0.90	8.64	10.40	17.46	26.69	23.07
Alim. Calculada	516.95	100.00	26.47	19.79	9.99	1.51	0.41	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0
Alim. Analisada			26.80	20.00	9.50	1.35	0.35					

Alimentação	
100	40
26.47	100
19.79	100
9.99	100
1.51	100
0.41	100

LEGENDA:

Produto	
Massa (%)	Sólidos (%)
Teor CaO (%)	Dist. CaO (%)
Teor MgO (%)	Dist. MgO (%)
Teor SiO ₂ (%)	Dist. SiO ₂ (%)
Teor Al ₂ O ₃ (%)	Dist. Al ₂ O ₃ (%)
Teor Fe ₂ O ₃ (%)	Dist. Fe ₂ O ₃ (%)



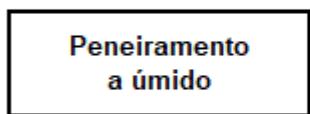
Balanço metalúrgico do ensaio de lavagem por peneiramento a úmido para amostra de dolomita:

Produto	Massa (g)	Massa (%)	Teores (%)					Distribuição (%)				
			CaO	MgO	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃
+ 106 µm	438.42	82.87	28.40	20.30	6.63	0.28	0.10	88.02	84.22	59.42	16.88	23.90
- 106 µm	90.63	17.13	18.70	18.40	21.90	6.67	1.54	11.98	15.78	40.58	83.12	76.10
Alim. Calculada	529.05	100.00	26.74	19.97	9.25	1.37	0.35	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0
Alim. Analisada			26.80	20.00	9.50	1.35	0.35					

Alimentação	
100	40
26.74	100
19.97	100
9.25	100
1.37	100
0.35	100

LEGENDA:

Produto	
Massa (%)	Sólidos (%)
Teor CaO (%)	Dist. CaO (%)
Teor MgO (%)	Dist. MgO (%)
Teor SiO ₂ (%)	Dist. SiO ₂ (%)
Teor Al ₂ O ₃ (%)	Dist. Al ₂ O ₃ (%)
Teor Fe ₂ O ₃ (%)	Dist. Fe ₂ O ₃ (%)



Passante	
17.13	
18.70	11.98
18.40	15.78
21.90	40.58
6.67	83.12
1.54	76.10

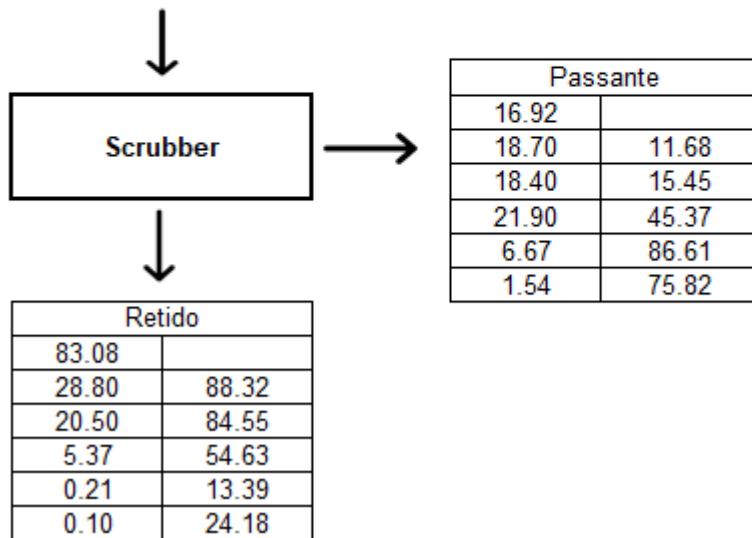
Retido	
82.87	
28.40	88.02
20.30	84.22
6.63	59.42
0.28	16.88
0.10	23.90

Balanço metalúrgico do ensaio de lavagem com *scrubber* para amostra de dolomita:

Produto	Massa (g)	Massa (%)	Teores (%)					Distribuição (%)				
			CaO	MgO	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃
+ 106 µm	452.89	83.08	28.80	20.50	5.37	0.21	0.10	88.32	84.55	54.63	13.39	24.18
- 106 µm	92.21	16.92	18.70	18.40	21.90	6.67	1.54	11.68	15.45	45.37	86.61	75.82
Alim. Calculada	545.10	100.00	27.09	20.14	8.17	1.30	0.34	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0
Alim. Analisada			26.80	20.00	9.50	1.35	0.35					

Alimentação	
100	40
27.09	100
20.14	100
8.17	100
1.30	100
0.34	100

LEGENDA: Produto	
Massa (%)	Sólidos (%)
Tenor CaO (%)	Dist. CaO (%)
Tenor MgO (%)	Dist. MgO (%)
Tenor SiO ₂ (%)	Dist. SiO ₂ (%)
Tenor Al ₂ O ₃ (%)	Dist. Al ₂ O ₃ (%)
Tenor Fe ₂ O ₃ (%)	Dist. Fe ₂ O ₃ (%)



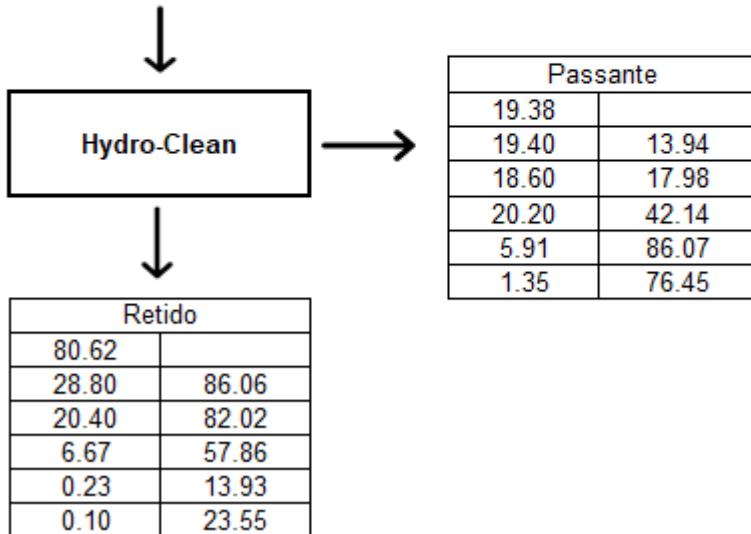
Balanço metalúrgico do ensaio de lavagem com *Hydro-Clean* 150 bar para amostra de dolomita:

Produto	Massa (g)	Massa (%)	Teores (%)					Distribuição (%)				
			CaO	MgO	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃
+ 106 µm	426.97	80.62	28.80	20.40	6.67	0.23	0.10	86.06	82.02	57.86	13.93	23.55
- 106 µm	102.66	19.38	19.40	18.60	20.20	5.91	1.35	13.94	17.98	42.14	86.07	76.45
Alim. Calculada	529.63	100.00	26.98	20.05	9.29	1.33	0.34	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0
Alim. Analisada			26.80	20.00	9.50	1.35	0.35					

Alimentação	
100	40
26.98	100
20.05	100
9.29	100
1.33	100
0.34	100

LEGENDA:

Produto	
Massa (%)	Sólidos (%)
Teor CaO (%)	Dist. CaO (%)
Teor MgO (%)	Dist. MgO (%)
Teor SiO ₂ (%)	Dist. SiO ₂ (%)
Teor Al ₂ O ₃ (%)	Dist. Al ₂ O ₃ (%)
Teor Fe ₂ O ₃ (%)	Dist. Fe ₂ O ₃ (%)

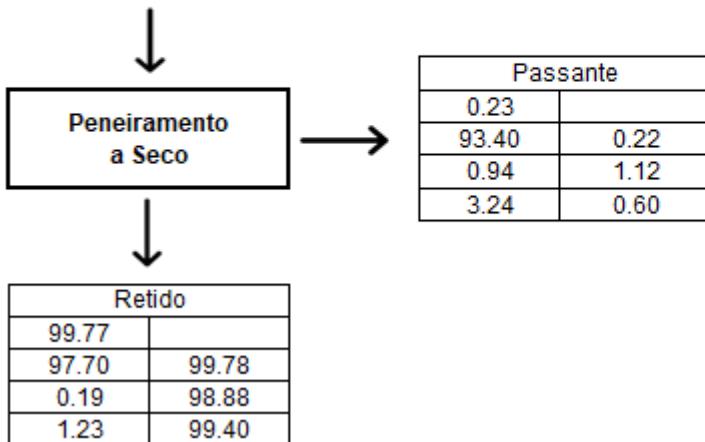


Quartzo

Balanço metalúrgico do ensaio de peneiramento a seco para amostra de quartzo:

Produto	Massa (g)	Massa (%)	Teores (%)			Distribuição (%)		
			SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃
+ 3,35 mm	510.47	99.77	97.70	0.19	1.23	99.78	98.89	99.40
- 3,35 mm	1.16	0.23	93.40	0.94	3.24	0.22	1.11	0.60
Alim. Calculada	511.63	100.00	97.69	0.19	1.23	100.0	100.0	100.0
Alim. Analisada			97.00	0.31	1.73			

Alimentação	
100	40
97.69	100
0.19	100
1.23	100



LEGENDA: Produto	
Massa (%)	Sólidos (%)
Teor SiO ₂ (%)	Dist. SiO ₂ (%)
Teor Al ₂ O ₃ (%)	Dist. Al ₂ O ₃ (%)
Teor Fe ₂ O ₃ (%)	Dist. Fe ₂ O ₃ (%)

Balanço metalúrgico do ensaio de lavagem por peneiramento a úmido para amostra de quartzo:

Produto	Massa (g)	Massa (%)	Teores (%)			Distribuição (%)		
			SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃
+ 3,35 mm	507.76	99.05	97.60	0.15	0.62	99.66	47.94	57.09
- 3,35 mm	4.88	0.95	34.57	16.95	48.48	0.34	52.06	42.91
Alim. Calculada	512.64	100.00	97.00	0.31	1.08	100.0	100.0	100.0
Alim. Analisada			97.00	0.31	1.73			

Alimentação	
100	40
97.00	100
0.31	100
1.08	100



Passante	
0.95	
34.57	0.34
16.95	52.06
48.48	42.91



Retido	
99.05	
97.60	99.66
0.15	47.94
0.62	57.09

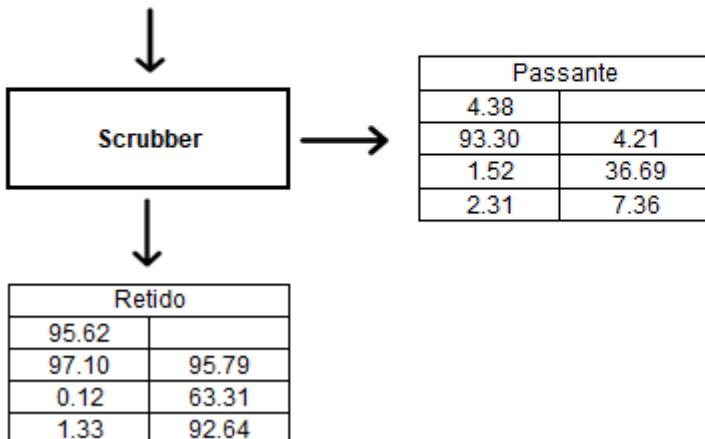
LEGENDA:

Produto	
Massa (%)	Sólidos (%)
Teor SiO ₂ (%)	Dist. SiO ₂ (%)
Teor Al ₂ O ₃ (%)	Dist. Al ₂ O ₃ (%)
Teor Fe ₂ O ₃ (%)	Dist. Fe ₂ O ₃ (%)

Balanço metalúrgico do ensaio de lavagem com *scrubber* para amostra de quartzo:

Produto	Massa (g)	Massa (%)	Teores (%)			Distribuição (%)		
			SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃
+ 3,35 mm	494.54	95.62	97.10	0.12	1.33	95.79	63.31	92.64
- 3,35 mm	22.63	4.38	93.30	1.52	2.31	4.21	36.69	7.36
Alim. Calculada	517.17	100.00	96.93	0.18	1.37	100.0	100.0	100.0
Alim. Analisada			97.00	0.31	1.73			

Alimentação	
100	40
96.93	100
0.18	100
1.37	100



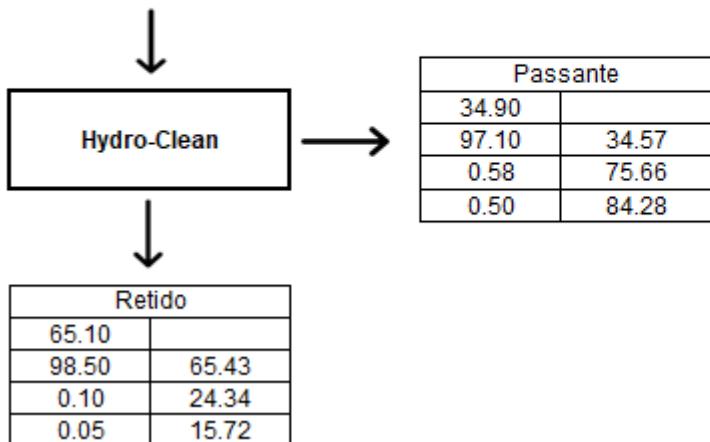
LEGENDA:

Produto	
Massa (%)	Sólidos (%)
Teor SiO ₂ (%)	Dist. SiO ₂ (%)
Teor Al ₂ O ₃ (%)	Dist. Al ₂ O ₃ (%)
Teor Fe ₂ O ₃ (%)	Dist. Fe ₂ O ₃ (%)

Balanço metalúrgico do ensaio de lavagem com *Hydro-Clean* 150 bar para amostra de quartzo:

Produto	Massa (g)	Massa (%)	Teores (%)			Distribuição (%)		
			SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃
+ 3,35 mm	351.78	65.10	98.50	0.10	0.05	65.43	24.34	15.72
- 3,35 mm	188.55	34.90	97.10	0.58	0.50	34.57	75.66	84.28
Alim. Calculada	540.33	100.00	98.01	0.27	0.21	100.0	100.0	100.0
Alim. Analisada			97.00	0.31	1.73			

Alimentação	
100	40
98.01	100
0.27	100
0.21	100



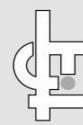
LEGENDA:

Produto	
Massa (%)	Sólidos (%)
Teor SiO ₂ (%)	Dist. SiO ₂ (%)
Teor Al ₂ O ₃ (%)	Dist. Al ₂ O ₃ (%)
Teor Fe ₂ O ₃ (%)	Dist. Fe ₂ O ₃ (%)

ANEXO – ANÁLISE QUÍMICA



Escola Politécnica da Universidade de São Paulo
 Departamento de Engenharia de Minas e de Petróleo
 Laboratório de Caracterização Tecnológica
 Av. Prof. Mello Moraes, 2373 CEP 05508-030 São Paulo - SP www.lct.poli.usp.br
 Tel: 11 3091-5151 e-mail: lct@lct.poli.usp.br



RESULTADOS DE ANÁLISE QUÍMICA

RELATÓRIO: FRX 709-19

REQ: 1150-19

DATA: 21/10/2019

CLIENTE: Mauricio Guimarães Bergerman

1. MÉTODO: Os teores apresentados foram determinados em amostra fundida com tetraborato de lítio, na calibração QFZ-1 (Quartzo e Feldspato), relativa a análise quantitativa por comparação com materiais de referência certificados, em espectrômetro de fluorescência de raios X, marca Malvern Panalytical, modelo Zetium. A Perda ao Fogo (PF) foi realizada a 1.020°C por 2h.

2. RESULTADOS:

Nº LCT	8624	8625	8626	8627
Amostra	Areia: + 106mm - pen. seco	Areia: + 106mm - pen. úmido	Areia: + 106mm - Scrubber	Areia: + 106mm - Hydroclean
SiO ₂ (%)	68,2	70,6	75,5	77,0
Al ₂ O ₃ (%)	15,4	13,5	10,8	11,0
Fe ₂ O ₃ (%)	4,91	4,96	4,12	3,68
MnO (%)	<0,05	0,18	<0,05	<0,05
MgO (%)	0,86	0,71	0,51	0,57
CaO (%)	0,45	0,38	0,27	0,31
Na ₂ O (%)	0,26	0,24	0,26	0,23
K ₂ O (%)	3,05	2,77	2,91	2,67
TiO ₂ (%)	0,73	0,66	0,48	0,50
P ₂ O ₅ (%)	<0,05	<0,05	0,06	<0,05
Cr ₂ O ₃ (%)	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01
ZrO ₂ (%)	0,03	0,02	0,02	0,02
PF (%)	6,38	5,79	4,38	4,21

Nº LCT	8628	8629	8630	8631
Amostra	Areia: - 106mm - pen. seco	Areia: - 106mm - pen. úmido	Areia: - 106mm - Scrubber	Areia: - 106mm - Hydroclean
SiO ₂ (%)	64,1	59,3	57,5	60,5
Al ₂ O ₃ (%)	17,8	20,3	20,9	18,8
Fe ₂ O ₃ (%)	5,64	6,48	6,72	5,91
MnO (%)	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05
MgO (%)	0,91	1,12	1,16	1,01
CaO (%)	0,47	0,57	0,50	0,47
Na ₂ O (%)	0,37	0,27	0,21	0,27
K ₂ O (%)	3,18	3,03	3,01	3,35
TiO ₂ (%)	0,90	1,03	1,09	1,05
P ₂ O ₅ (%)	0,07	0,06	0,06	0,06
Cr ₂ O ₃ (%)	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01
ZrO ₂ (%)	0,05	0,04	0,04	0,05



Nº LCT	8628	8629	8630	8631
Amostra	Areia: - 106mm - pen. seco	Areia: - 106mm - pen. úmido	Areia: - 106mm - Scrubber	Areia: - 106mm - Hydroclean
PF (%)	6,94	7,92	8,95	8,12

Executado por: Dra. Gislayne Kelmer - CRQ 04165656-4ºR (21/10/2019 08:25 BRT)
 Revisado por: Saulo Colenç - CRQ 04262337-4ºR (22/10/2019 14:13 BRT)

Profa. Dra. Carina Ulsen
 Coordenadora do LCT - Poli/USP

NOTA: Os resultados expostos acima referem-se apenas à(s) amostra(s) enviada(s) ao LCT; a representatividade da(s) mesma(s) é de inteira responsabilidade do cliente.

Verifique a autenticidade deste documento em www.lct.poli.usp.br utilizando o código **FEQN-IIVK-KVKS-OSPB**

Relatório FRX 709-19

Página 2 de 2



RESULTADOS DE ANÁLISE QUÍMICA

RELATÓRIO: FRX 703-19

REQ: 1151-19

DATA: 17/10/2019

CLIENTE: Mauricio Guimarães Bergerman

1. MÉTODO: Os teores apresentados foram determinados em amostra fundida com tetraborato de lítio, na calibração CAC-1 (Calcários), relativa a análise quantitativa por comparação com materiais de referência certificados, em espectrômetro de fluorescência de raios X, marca Malvern Panalytical, modelo Zetium. A Perda ao Fogo (PF) foi realizada a 1.020°C por 2h.

2. RESULTADOS:

Nº LCT	Amostra	CaO (%)	MgO (%)	SiO ₂ (%)	Al ₂ O ₃ (%)	Fe ₂ O ₃ (%)	PF (%)
8632	Dolomita: + 106mm - pen. seco	27,0	19,8	9,28	1,26	0,33	41,4
RA/8632	Dolomita: + 106mm - pen. seco	27,0	19,8	9,21	1,24	0,35	41,7
8633	Dolomita: + 106mm - pen. úmido	28,4	20,3	6,63	0,28	0,10	43,4
8634	Dolomita: + 106mm - Scrubber	28,8	20,5	5,37	0,21	<0,10	44,1
8635	Dolomita: + 106mm - Hydroclean	28,8	20,4	6,67	0,23	<0,10	43,4
8636	Dolomita: - 106mm - pen. seco	21,9	19,7	16,7	3,87	0,90	36,2
8637	Dolomita: - 106mm - pen. úmido	17,8	17,6	21,9	7,84	1,56	32,4
8638	Dolomita: - 106mm - Scrubber	18,7	18,4	21,9	6,67	1,54	32,9
8639	Dolomita: - 106mm - Hydroclean	19,4	18,6	20,2	5,91	1,35	34,0
8640	Dolomita: amostra inicial 1	26,2	19,8	9,89	1,50	0,40	41,4
RP/8640	Dolomita: amostra inicial 1	26,2	19,7	9,88	1,46	0,38	41,3
8641	Dolomita: amostra inicial 2	26,7	19,9	9,58	1,42	0,37	41,7
8642	Dolomita: amostra inicial 3	26,8	20,0	9,50	1,35	0,35	41,7
MR/16_22	LCT-09 - Dolomita - Referência	30,6	21,6	0,43	0,06	0,04	-
MR/16_22	LCT-09 - Dolomita - Analisado	30,8	21,5	0,41	<0,10	<0,10	na

RA - replicata de análise

RP - replicata de preparação

MR - material de referência

na - não analisado

Executado por: Dra. Gislayne Kelmer - CRQ 04165656-4ºR (18/10/2019 10:27 BRT)
Revisado por: Dra. Maria Manuela Tassinari (18/10/2019 14:35 BRT)

Profa. Dra. Carina Ulsen
Coordenadora do LCT - Poli/USP

NOTA: Os resultados expostos acima referem-se apenas à(s) amostra(s) enviada(s) ao LCT; a representatividade da(s) mesma(s) é de inteira responsabilidade do cliente.

Verifique a autenticidade deste documento em www.lct.poli.usp.br utilizando o código **AIQV-IFVJ-EEES-QHGB**

Relatório FRX 703-19

Página 1 de 1



RESULTADOS DE ANÁLISE QUÍMICA

RELATÓRIO: FRX 724-19

REQ: 1152-19

DATA: 30/10/2019

CLIENTE: Mauricio Guimarães Bergerman

1. MÉTODO: Os teores apresentados foram determinados em amostra fundida com tetraborato de lítio, na calibração QFZ-1 (Quartzo e Feldspato), relativa a análise quantitativa por comparação com materiais de referência certificados, em espectrômetro de fluorescência de raios X, marca Malvern Panalytical, modelo Zetium. A Perda ao Fogo (PF) foi realizada a 1.020°C por 2h.

2. RESULTADOS:

Nº LCT	8643	8644	RA/8644	8645
Amostra	Quartzo: + 3,35 - pen. seco	Quartzo: + 3,35 - pen. úmido	Quartzo: + 3,35 - pen. úmido	Quartzo: + 3,35 - Scrubber
SiO ₂ (%)	97,7	98,2	97,6	97,1
Al ₂ O ₃ (%)	0,19	0,15	0,15	0,12
Fe ₂ O ₃ (%)	1,23	0,63	0,62	1,33
MnO (%)	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05
MgO (%)	<0,10	<0,10	<0,10	<0,10
CaO (%)	<0,10	<0,10	<0,10	<0,10
Na ₂ O (%)	<0,10	<0,10	<0,10	<0,10
K ₂ O (%)	<0,10	<0,10	<0,10	<0,10
TiO ₂ (%)	0,02	0,02	0,02	0,02
P ₂ O ₅ (%)	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05
Cr ₂ O ₃ (%)	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01
ZrO ₂ (%)	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01
PF (%)	0,25	0,24	0,23	0,33

Nº LCT	8646	8647	8648	8649
Amostra	Quartzo: + 3,35 - Hydroclean	Quartzo: - 3,35mm - pen. seco	Quartzo: - 3,35mm - pen. úmido	Quartzo: - 3,35mm - Scrubber
SiO ₂ (%)	98,5	93,4	37,2	93,3
Al ₂ O ₃ (%)	<0,10	0,94	27,2	1,52
Fe ₂ O ₃ (%)	<0,05	3,24	2,54	2,31
MnO (%)	<0,05	0,12	0,08	0,08
MgO (%)	<0,10	<0,10	0,81	0,35
CaO (%)	<0,10	<0,10	5,03	<0,10
Na ₂ O (%)	<0,10	<0,10	1,01	<0,10
K ₂ O (%)	<0,10	0,23	0,74	0,47
TiO ₂ (%)	0,03	0,07	1,40	0,13
P ₂ O ₅ (%)	<0,05	<0,05	0,20	<0,05
Cr ₂ O ₃ (%)	<0,01	<0,01	<0,01	0,03
ZrO ₂ (%)	0,01	<0,01	0,12	<0,01
PF (%)	0,34	0,86	14,5	1,19



Nº LCT	8650	8651	8652	RP/8652
Amostra	Quartzo: - 3,35mm - Hydroclean	Quartzo: amostra inicial 1	Quartzo: amostra inicial 2	Quartzo: amostra inicial 2
SiO ₂ (%)	97,1	96,5	96,9	97,0
Al ₂ O ₃ (%)	0,58	0,32	0,32	0,30
Fe ₂ O ₃ (%)	0,50	1,88	1,92	1,73
MnO (%)	<0,05	<0,05	0,05	<0,05
MgO (%)	<0,10	<0,10	<0,10	<0,10
CaO (%)	<0,10	<0,10	<0,10	<0,10
Na ₂ O (%)	<0,10	<0,10	<0,10	<0,10
K ₂ O (%)	0,21	<0,10	<0,10	<0,10
TiO ₂ (%)	0,05	0,04	0,04	0,03
P ₂ O ₅ (%)	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05
Cr ₂ O ₃ (%)	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01
ZrO ₂ (%)	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01
PF (%)	0,49	0,29	0,49	0,52

Nº LCT	8653
Amostra	Quartzo: amostra inicial 3
SiO ₂ (%)	96,7
Al ₂ O ₃ (%)	0,31
Fe ₂ O ₃ (%)	1,88
MnO (%)	<0,05
MgO (%)	<0,10
CaO (%)	<0,10
Na ₂ O (%)	<0,10
K ₂ O (%)	<0,10
TiO ₂ (%)	0,03
P ₂ O ₅ (%)	<0,05
Cr ₂ O ₃ (%)	<0,01
ZrO ₂ (%)	<0,01
PF (%)	0,50

RA - replicata de análise

RP - replicata de preparação

Executado por: Dra. Gislayne Kelmer - CRQ 04165656-4^aR (30/10/2019 18:05 BRT)
 Revisado por: Saulo Colenci - CRQ 04262337-4^aR (30/10/2019 18:08 BRT)

Profa. Dra. Carina Ulsen
 Coordenadora do LCT - Poli/USP

NOTA: Os resultados expostos acima referem-se apenas à(s) amostra(s) enviada(s) ao LCT; a representatividade da(s) mesma(s) é de inteira responsabilidade do cliente.

Verifique a autenticidade deste documento em www.lct.poli.usp.br utilizando o código **MXQK-OYVS-CTXS-MTOB**

Relatório FRX 724-19

Página 2 de 2