

PMC - 580

PROJETO

MECÂNICO 1

**Tema : Granulômetro de Decantação para
Carbonato de Cálcio Micronizado**

Alunos :

Almiro Carvalho Junior Nº USP 1853288
Alexandre S. R. Morales Nº USP 1850568

Orientador :

Professor João Paulo Marcicano

Coordenador da disciplina :

Professor Omar Moore Madureira

ÍNDICE

1. INTRODUÇÃO	2
1.1 PMC - 580 - PROJETO MECÂNICO 1	2
1.2 O PROJETO	2
PARTE 1 : ESTUDO DE VIABILIDADE	
1. INTRODUÇÃO	5
1.1 TÓPICOS	5
1.2 Carbonato de Cálcio	5
1.2.1 Fontes	6
1.2.2 Processamento	6
1.2.3 Aplicação	7
1.2.4 Métodos de Controle de Qualidade	7
1.2.5 Dificuldade de Produção	7
1.2.6 Realidade Brasileira	8
2. ESTABELECIMENTO DA NECESSIDADE	8
2.1 CARACTERÍSTICAS E LIMITES	8
3. ESPECIFICAÇÕES TÉCNICAS	10
4. SÍNTESE DE SOLUÇÕES	13
4.1 Medidor de Concentração por Feixe de Luz	13
4.2 Hidrômetros Miniatura	15
4.3 Balança de Decantação	16
4.4 Túnel de Decantação Horizontal	17
4.5 Microscopia	19
5. SOLUÇÕES VIÁVEIS	19
5.1 Comparação	21
5.1.1 Custo	21
5.1.2 Tamanho e Manipulação	21
5.1.3 Substâncias Descartáveis	21
5.1.4 Versatilidade	22
5.1.5 Precisão	22
5.1.6 Operação	22
5.1.7 Tempo de Medição	22
5.1.8 Entradas e Saídas	22
5.1.9 Resíduos	23
5.1.10 Durabilidade	23
6. CONCLUSÃO	24
APÊNDICE A - INTERAÇÃO ENTRE PARTÍCULAS E FLUIDOS	25
APÊNDICE B - METODOLOGIA DE CÁLCULO PARA AS SOLUÇÕES POSSÍVEIS	30
APÊNDICE C - CRONOGRAMA DE ATIVIDADES	33

1. INTRODUÇÃO

1.1 PMC - 580 : PROJETO MECÂNICO 1

O objetivo da disciplina PMC 580 é o de reunir todo o conhecimento adquirido durante o curso de Engenharia Mecânica da Escola Politécnica utilizando-o para o desenvolvimento de um projeto de engenharia completo. Idealmente, o projeto deve conter todas as características básicas de uma das três divisões do curso (Projeto e Fabricação, Energia e Fluidos ou Automação e Sistemas) sendo desejável a incorporação de aspectos importantes das outras duas áreas.

Preferencialmente, o projeto deve satisfazer uma necessidade atual na área de Engenharia Mecânica e oferecer uma solução prática e viável para esta necessidade.

O projeto será desenvolvido em duas partes. A primeira será executada durante o primeiro semestre de 1994 e constitui-se do Estudo de Viabilidade. A segunda, realizada durante o segundo semestre de 1994, constitui-se do Projeto Básico e Projeto Executivo. O projeto executivo compreenderá, além dos memoriais de cálculo finais, a construção e teste de um protótipo.

A área de especialização será a de Projeto e Fabricação mas serão abordados problemas estudados pelas outras áreas com o intuito de se realizar um projeto de engenharia completo.

O coordenador desta área é o Professor Omar Moore Madureira e o nosso orientador é o Professor João Paulo Marcicano.

1.2 O PROJETO

O projeto a ser desenvolvido insere-se indiretamente na área petroquímica da engenharia. Dentro desta área, o setor de produção de compostos polimerizados constitui-se um dos mais importantes, com empresas brasileiras reconhecidas internacionalmente, competindo num mercado não oligopolizado. A fonte de recursos para este setor é regulada pela empresa estatal Petrobrás ramificando-se através de diversas empresas responsáveis pelo refino do petróleo e pela transformação de seus subprodutos. O mercado deste setor, que abrange todo o Brasil, esteve em crescimento nos últimos anos, mas hoje encontra-se estabilizado. A utilização de compostos plásticos vai desde a substituição de metais em estruturas mecânicas até sua utilização como decoração no lugar de rochas como o mármore e o granito. Vale ressaltar a influência da atual política ambiental mundial no desenvolvimento tecnológico deste setor.

Particularmente, o ramo de produção de compostos de PVC (*Poli - Vinil - Cloride*) é o responsável pelo abastecimento de inúmeros setores produtivos e sua utilização vai desde embalagens alimentícias até tubulações. Este ramo depende do fornecimento de uma série de matérias-primas, derivadas do petróleo ou não, para a produção dos compostos. Dentre estas matérias-primas situa-se o Carbonato de Cálcio (CaCO_3) que é inserido sob a forma de minúsculas partículas aproximadamente esféricas com diâmetros que variam de 40 até $0.5\mu\text{m}$ e é chamado de *carga* (o papel do CaCO_3 na produção de compostos de PVC será detalhada mais adiante).

A qualidade desta matéria-prima afeta diretamente a qualidade do composto e, consequentemente é fator limitante de sua aplicação. Atualmente existem dispositivos de medição sofisticados capazes de determinar com grande precisão as características de uma gama muito grande de tipos de partículas. Estes dispositivos, contudo, são extremamente caros.

O intuito do projeto, então, é desenvolver um dispositivo de medição para o controle de qualidade do CaCO_3 segundo especificações para a produção de compostos de PVC.

Escola Politécnica da Universidade de São Paulo
Departamento de Engenharia Mecânica

PMC - 580 PROJETO MECÂNICO I

PARTE 1

ESTUDO DE VIABILIDADE

1. INTRODUÇÃO

1.1 TÓPICOS

O estudo de viabilidade apresentado a seguir contém os seguintes tópicos a respeito do projeto a ser desenvolvido nesta primeira etapa :

- **Estabelecimento da necessidade** : Será explicitada a necessidade a ser satisfeita pelo projeto e discutidos, qualitativamente, os seus limites.
- **Especificações Técnicas** : Em função da necessidade e dos limites estabelecidos, as especificações técnicas principais e as características funcionais e construtivas do projeto serão fixados (algumas características poderão ser modificadas no decorrer do projeto).
- **Síntese de Soluções** : Serão apresentadas e discutidas as possíveis soluções para o problema.
- **Soluções Viáveis** : Dentre aquelas apresentadas no item anterior serão escolhidas aquelas que atendam melhor a necessidade.

Porém, antes do estabelecimento da necessidade, discutiremos com maior detalhe o ambiente em que o projeto será inserido a fim de que as análises posteriores sejam melhor compreendidas.

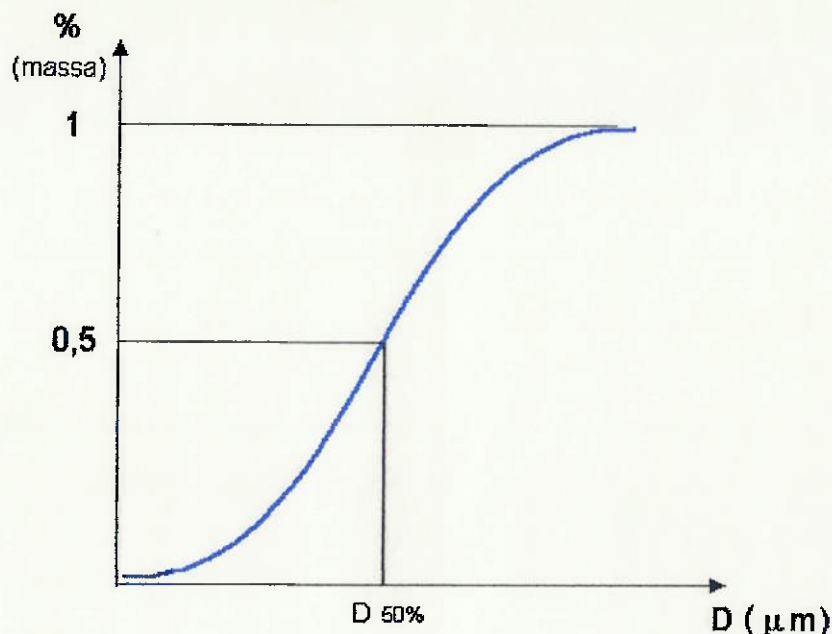
1.2 Carbonato de Cálcio

Para melhor compreensão do que será discutido a seguir, introduziremos brevemente o conceito de granulometria.

A melhor maneira de se caracterizar uma amostra de partículas sólidas é através de sua distribuição granulométrica. Ela expressa a quantidade existente, na amostra, de cada tamanho (tamanho, aqui, pode ser conceituado de várias maneiras, como se verá posteriormente) de partícula. Tipicamente, uma distribuição granulométrica é apresentada sob a forma de um gráfico (ver figura abaixo) com a porcentagem em massa (acumulada) nas ordenadas e o tamanho da partícula nas abscissas.

No caso do Carbonato de Cálcio, o tamanho de uma partícula é referido como diâmetro. Essa medida pode ter vários significados, conforme o tipo de análise :

- Diâmetro de uma esfera com o mesmo volume da partícula.
- Diâmetro de uma esfera com a mesma área superficial da partícula.
- Diâmetro de uma esfera que tem a mesma velocidade de queda que a partícula num dado fluido sob a ação de um campo gravitacional, etc.



Geralmente, a distribuição granulométrica é dividida em faixas de diâmetros e apresentada sob a forma de um histograma de freqüências, ou possui uma escala logarítmica de diâmetros.

1.2.1 Fontes

O carbonato de cálcio (CaCO_3) é encontrado no Brasil em jazidas extensas de rochas como o calcário e o mármore. Ele ocorre naturalmente em duas formas cristalinas : a calcita e a aragonita. Quando aquecida, a aragonita transforma-se na calcita. O cristal de calcita possui forma romboédrica e o cristal de aragonita possui forma ortorrômbica. A extração da calcita é extremamente simples e barata de modo que o valor do produto varia de acordo com a pureza da rocha extraída (quantidade de sílica e outros elementos) e, principalmente, com a qualidade do processamento a que é submetida.

1.2.2 Processamento

Os blocos de calcita extraídos são processados em moinhos para a obtenção do Carbonato de Cálcio micronizado, um pó alvo e muito fino (semelhante ao talco). O valor obtido pela venda deste pó depende diretamente do seu grau de pureza e de sua distribuição granulométrica. As partículas menores ($1\mu\text{m}$ ou menos) são as mais caras e possuem aplicação especial. As partículas maiores (mais de $1\mu\text{m}$) são responsáveis pelo maior volume comercializado e se prestam para a produção de papel, tintas, plásticos e cal virgem. As empresas mundiais produtoras de Carbonato de Cálcio destacam-se devido ao alto nível tecnológico do seu setor de produção.

1.2.3 Aplicação

O Carbonato de Cálcio é introduzido nas formulações de compostos plásticos como *carga (filler, em inglês)* com os seguintes objetivos, entre outros :

- Aumentar a dureza e rigidez do composto
- Reduzir o seu custo
- Melhorar a resistência ao calor
- Modificar a aparência
- Regular características elétricas

A proporção de CaCO_3 nos compostos de PVC, por exemplo, varia muito em função da aplicação do composto, mas uma formulação típica contém cerca de 25% de Carbonato de Cálcio com partículas na faixa de $1\mu\text{m}$ até $40\mu\text{m}$ de diâmetro.

Por estar presente em grandes quantidades, o CaCO_3 tem grande influência sobre a qualidade do composto plástico, isto é, a distribuição granulométrica da carga afeta grandemente as características do polímero, tanto estéticas como físicas. Por esse motivo, é fundamental que se conheça a distribuição granulométrica do Carbonato de Cálcio com boa precisão para que suas possíveis aplicações possam ser estabelecidas.

1.2.4 Métodos de controle de qualidade

Para a garantia de que a distribuição granulométrica do CaCO_3 possua características específicas, para uma dada aplicação, existem diversos dispositivos e métodos de medição desta distribuição granulométrica. Infelizmente, estes métodos dividem-se em duas classes diametralmente opostas. Aqueles que utilizam aparelhos sofisticados e que fornecem com precisão a curva granulométrica de amostras com uma faixa muito grande de dimensões e aqueles realizados com equipamento de laboratório com capacidade, apenas, de fornecer informações comparativas.

Os aparelhos de medição são, na maioria, importados e utilizam-se de técnicas que vão desde o uso de raio-X até centrifugação e prestam-se a uma gama muito grande de partículas. O preço destes aparelhos varia entre 12 e 60 mil dólares (1994).

Já as técnicas de laboratório constituem-se basicamente de uma experiência de decantação onde se obtém uma curva de decantação em função do tempo. Esta técnica é utilizada comparativamente entre várias amostras e possibilita uma classificação admissível para a maioria das aplicações. Contudo, quando se deseja um melhor controle da distribuição granulométrica do CaCO_3 , este método deixa de ser satisfatório.

1.2.5 Dificuldades de Produção

O ponto crítico da produção de Carbonato de Cálcio micronizado é a etapa de separação, onde as partículas na faixa desejada são separadas das partículas fora dessa faixa. Qualquer que seja o método de separação, existem muitos fatores que afetam o seu desempenho e estes são, em muitos casos, desconhecidos ou de difícil controle. Então, a única maneira que o produtor tem de garantir a qualidade de seu produto é medindo precisamente a distribuição granulométrica de uma amostra. Como isto ocorre durante a produção, uma falha no processo de separação pode ser descoberta só após a produção de algumas toneladas de Carbonato fora da especificação.

1.2.6 Realidade Brasileira

No Brasil, a produção de Carbonato de Cálcio micronizado é feita por poucas empresas. A maioria delas possui equipamento pouco eficiente e nenhum método de controle de qualidade. Assim sendo, parte do mercado produtor de compostos de PVC é abastecido com matéria prima nacional de baixa qualidade. Infelizmente, o CaCO_3 possui pouco valor agregado e transporte muito caro para que a importação seja interessante.

A maioria das empresas nacionais produtoras de CaCO_3 micronizado não se preocupa em controlar a qualidade da produção mais do que já controlam. Algumas se preocupam, mas não dispõem de equipamento suficientemente preciso e barato para tanto.

Tendo em vista o que foi exposto acima, podemos estabelecer a necessidade a ser satisfeita pelo projeto. Muitos detalhes não abordados na introdução ficarão claros ao longo do estudo de viabilidade.

2. ESTABELECIMENTO DA NECESSIDADE

Após a introdução dada a respeito do produto e do mercado a que se destina o nosso projeto, somos capazes de estabelecer a necessidade a ser satisfeita. Podemos sintetizá-la como :

“ Construir um dispositivo de medição da distribuição granulométrica do Carbonato de Cálcio micronizado para atender às especificações do mercado produtor de compostos de PVC.”

Esta necessidade foi estabelecida a partir de três observações básicas :

- Os aparelhos de medição disponíveis são muito caros e exigem cuidadosa manipulação.
- O processo de modernização do processo produtivo de CaCO_3 micronizado é grandemente retardado por falta de *feed-back*, isto é, faltam métodos precisos de se medir a eficiência de uma planta de produção.
- O desenvolvimento de compostos de PVC de alta qualidade sofre com as flutuações da qualidade de suas matérias primas, com destaque para o Carbonato de Cálcio.

2.1 CARACTERÍSTICAS E LIMITES

A partir da necessidade podemos fazer algumas análises a respeito do desempenho desejado do aparelho e seus limites :

1. O principal requisito de projeto é o baixo custo. Obviamente, não poderemos construir um aparelho que custe tanto quanto o importado.

2. É interessante que o aparelho possua tamanho reduzido de modo que possa ser transportado facilmente, não exija cuidados excessivos de manipulação e possa ser utilizado fora de laboratório, isto é, não necessite de ambiente controlado.

Obviamente, a versatilidade do aparelho está intimamente ligada com o seu desempenho de modo que um ponto de equilíbrio deverá ser encontrado.

3. Todas as substâncias e materiais utilizados pelo aparelho, além da amostra a ser medida, devem ser baratos e de fácil substituição.

Este requisito poderá ser modificado conforme a necessidade. Por exemplo, cada particulado possui um determinado agente químico dispersante que é fundamental em certos processos de medição e que contribui para o encarecimento do aparelho.

4. O aparelho será destinado apenas para a medição da distribuição granulométrica de Carbonato de Cálcio micronizado.

Todos os estudos e a calibragem do aparelho levarão em conta somente este tipo de partícula.

5. A precisão do aparelho é um fator importante mas de difícil pré-fixação. A princípio podemos admitir que será quase impossível atingir a precisão dos aparelhos eletrônicos a base de raio-x. Da mesma maneira, não podemos ter uma precisão tão ruim a ponto de inutilizar o aparelho.

Portanto, a precisão será o principal fator limitante da utilização deste aparelho. Sobre este tópico serão concentrados os esforços de análise e projeto de maneira a chegarmos à melhor solução possível dentro do limite de custos imposto.

6. O aparelho deverá independar da habilidade do operador para a execução da medida. O processo de medição será padronizado e não deverá haver margem para a introdução de erros além daqueles inerentes ao projeto.

A respeito deste assunto vale levantar a questão do processo de amostragem. O ponto importante é que a amostra a ser medida deverá representar o melhor possível a quantidade produzida. Isto implica que alguns gramas de CaCO_3 possuam a mesma distribuição granulométrica que a tonelada de onde a amostra foi retirada. Um estudo sobre esta questão será feito na etapa de Projeto Básico. Serão definidos alguns métodos de amostragem e alguns procedimentos que devem ser seguidos para garantir a precisão da medida.

7. O tempo de medida não deverá ser superior àquele normalmente encontrado nos aparelhos de medição disponíveis.

8. O sistema terá como entrada uma certa quantidade de CaCO_3 micronizado e como saída um conjunto de dados a partir do qual a distribuição granulométrica daquela amostra pode ser obtida.

9. O aparelho deverá produzir o mínimo de resíduos não reaproveitáveis. Tais resíduos não devem ser tóxicos e devem ser retornáveis à natureza sem consequências indesejáveis.

10. O aparelho deve ter uma longa durabilidade e manter as suas características operacionais durante este período.

3. ESPECIFICAÇÕES TÉCNICAS

Das características explicitadas no item anterior, podemos estabelecer um conjunto de especificações técnicas a partir do qual as soluções possíveis poderão ser comparadas.

1. Custo

Tendo em vista que este não é um aparelho destinado à produção em série, estabelecemos para este projeto um custo não superior à 1,5 mil reais (aproximadamente 1,5 mil dólares). Este valor não inclui possível aparato de automação (como placa de conversão de sinais e cabos), *softwares* de processamento de dados ou peças de reposição.

2. Tamanho e Manipulação

A menos de aparatos de informática, estabelecemos que o aparelho deve ocupar, montado e pronto para operação, um volume máximo equivalente à um paralelepípedo de 30 cm de largura X 30 cm de comprimento X 45 cm de altura e pesar não mais de 4kg. O aparelho poderá ser guardado em caixa ou mantido em bancada de laboratório. O transporte do aparelho poderá ser feito apenas por uma pessoa utilizando uma das mãos.

Durante sua utilização, deverá estar sobre uma base plana com ajuste de nível num local isento de vibrações e variações significativas de temperatura (estes requisitos serão confirmados posteriormente). O operador deverá introduzir a amostra conforme procedimento de medida e observar o aparelho pelo tempo determinado (no caso de leitura não automatizada) ou acompanhar o computador. Não deverá haver a necessidade de intervenção por parte do operador durante o processo de medição.

Após a medição, o aparelho poderá ser lavado com água normal estando pronto para nova medida. Todas as partes do aparelho devem ser resistentes ao contato com o CaCO_3 e de fácil acesso para limpeza. Preferencialmente, o aparelho deve ser desmontável para reposição de peças e resistente a pequenos choques.

No caso de automatização com computador, este deverá fornecer um gráfico com a distribuição granulométrica da amostra, eliminando qualquer trabalho por parte do operador.

3. Substâncias Descartáveis

Quase a totalidade dos aparelhos de medição de distribuição granulométrica requerem que o particulado esteja em suspensão em algum fluido. Como dito anteriormente, é importante que o pó esteja bem disperso neste fluido. No caso do CaCO_3 , o melhor fluido para suspensão é a água, dada a insolubilidade do Carbonato de Cálcio neste fluido. Talvez haja a necessidade da inclusão de algum aditivo em pequenas quantidades mas este, também, deve ser não tóxico, barato e de fácil reposição.

4. Versatilidade

Como especificado anteriormente, o aparelho será destinado à medição somente de particulados de Carbonato de Cálcio. Não há a necessidade de se garantir a validade da medida para outros tipos de partículas.

5. Precisão

Com relação à precisão do aparelho, dois aspectos importantes devem ser considerados :

Em primeiro lugar há a precisão da medida da distribuição granulométrica, que é o que realmente interessa. Em seguida, há a precisão da grandeza que o aparelho irá medir, qualquer que seja ela. Dizemos aqui qualquer que seja ela pois os vários métodos de determinação da distribuição granulométrica de um particulado partem de medidas como a concentração da suspensão, numa coluna de decantação, ou da massa decantada ao longo do tempo. Logo, é óbvio que a medida tomada diretamente do aparelho deve possuir maior precisão que aquela exigida para a distribuição granulométrica pois será na etapa de transformação dos dados que os erros surgirão.

A aplicação do CaCO_3 para a fabricação de compostos de PVC não abrange todas as faixas de distribuição granulométrica entre $1\mu\text{m}$ e $40\mu\text{m}$. São produzidas basicamente 3 faixas : $1\mu\text{m}$, $10\mu\text{m}$ e $20\mu\text{m}$ (entenda como faixa a distribuição com 50% da massa possuindo diâmetro igual ou menor que o valor considerado, isto é, a faixa de $1\mu\text{m}$ possui distribuição granulométrica onde 50% da amostra possui $1\mu\text{m}$ ou menos de diâmetro, por exemplo).

Portanto, para o nosso projeto, especificaremos uma precisão de **10%** para a medida destas faixas. Este valor se refere ao ponto médio da distribuição granulométrica (50% da frequência acumulada) podendo ser maior nos extremos da curva, que não possuem tanto interesse.

No caso da faixa de $1\mu\text{m}$, a literatura comprova a existência de diversos problemas de difícil solução no processo de medição. Desse modo, a precisão de **10%** pode se revelar inatingível pelo nosso aparelho. Para este caso, pretendemos fazer um estudo paralelo de correções matemáticas por computador com o objetivo de minimizar ao máximo estes problemas (ou comprovar a limitação do aparelho para medidas desta magnitude).

Além disso, um estudo estatístico será feito como modo de se quantificar os diversos fatores que afetam a precisão do aparelho. Estes fatores incluem fenômenos aleatórios que afetam medidas consecutivas da mesma amostra e erros inerentes ao processo de medição que afastam o resultado da distribuição real.

Como uma alternativa, o processo de obtenção da distribuição granulométrica da amostra poderá fornecer, ao invés de uma medida desta distribuição, o desvio dela em relação à uma amostra padronizada considerada aceitável.

Os aspectos de precisão, por dependerem diretamente do método de medição adotado e do projeto do aparelho, só poderão ser melhor analisados quando da escolha da solução e da construção de um protótipo. Por enquanto, o valor de 10% de precisão é adequado como forma de comparação no início das análises.

6. Operação

Como definido anteriormente, o aparelho projetado deve ser auto-suficiente durante o processo de medição. O operador participa apenas na etapa inicial do processo com a introdução da amostra no aparelho e da leitura e interpretação do resultado. Esta leitura pode ser feita visualmente ao longo do processo ou automaticamente através de um computador com interface adequada.

7. Tempo de Medição

Os aparelhos disponíveis para a determinação da distribuição granulométrica de particulados levam em média 20 minutos para a execução da medida. Desse modo estabelecemos o "teto" de 30 minutos para o nosso aparelho.

8. Entradas e Saídas

Dependendo do tipo de medição a ser feita pelo aparelho, o único elemento de entrada é a amostra de CaCO_3 . Em casos de colunas de decantação, esta amostra deve ser pré diluída com o mesmo fluido da coluna. Então, podemos ter dois tipos de entradas para o aparelho : a amostra sob a forma de particulado ou uma solução da amostra. A quantidade de particulado depende do método utilizado não devendo exceder, contudo, 50 gramas para cada medição.

A saída do aparelho, como comentamos acima, pode ser um conjunto de valores lidos pelo operador durante o processo de medição ou um gráfico com a própria distribuição granulométrica, no caso de leitura automatizada. Em ambos os casos, a obtenção do resultado final, após a finalização do processo de leitura, não deve demorar mais do que 10 minutos, o que daria um tempo total de 40 minutos, no máximo.

9. Resíduos

As especificações técnicas desse item serão estabelecidas com a escolha da solução para o projeto sem, contudo, ferir as características desejadas que foram explicitadas anteriormente

10. Durabilidade

Como tempo de vida para o aparelho, estabelecemos a média de 2 anos. Para esta estimativa admitimos um uso do aparelho 50% das vezes fora de laboratório em condições que possam afetar a sua integridade. Durante este período, as características técnicas deverão ser mantidas e, após ele, poderá ser requerida a substituição de algum componente do aparelho ou a execução de uma nova calibragem.

Por fim, as especificações técnicas estabelecidas para este estudo de viabilidade estão resumidas no quadro abaixo. É importante ter em mente que estes valores não são rígidos e servem apenas para a comparação entre as diversas soluções possíveis para o problema. Caso as soluções viáveis permitam, as especificações estabelecidas serão tomadas como objetivo até o final do projeto.

Custo	no máximo R\$ 1500,00, incluso apenas o custo de produção do aparelho completo.
Tamanho e Manipulação	Volume : 30 cm de largura X 30 cm de comprimento X 45 cm de altura. Peso : menor que 4kg
Substâncias Descartáveis	Água e possivelmente algum aditivo não tóxico
Versatilidade	Medida restrita a particulados de Carbonato de Cálcio
Precisão	10% para a distribuição granulométrica contando erros de aparelhagem, cálculos e imprecisões de medida.
Operação	Ação direta do operador apenas no início. O procedimento deve ser padronizado.
Tempo de Medição	No máximo 40 minutos contando manipulação de dados
Entradas e Saídas	Entrada : Amostra de particulado com massa não superior a 50 gramas ou uma solução desta amostra. Saída : conjunto de dados que permita a obtenção da curva granulométrica com a precisão desejada.
Resíduos	Não tóxicos e biodegradáveis
Durabilidade	2 anos em média sem substituição de peças

4. SÍNTESE DE SOLUÇÕES

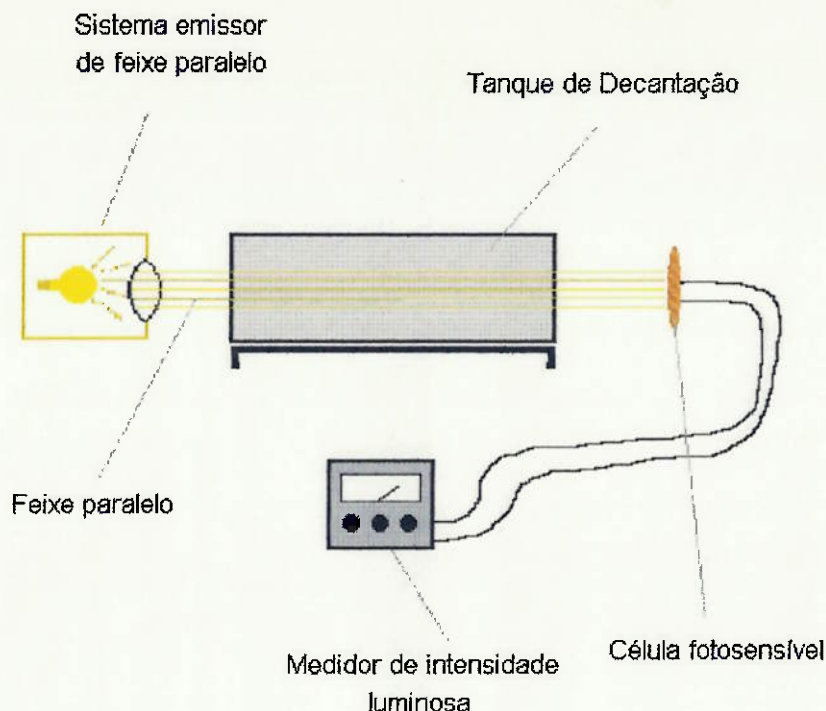
Com as especificações técnicas iniciais estabelecidas, apresentamos a seguir algumas soluções possíveis para o problema.

Muitas das soluções apresentadas envolvem a interação de partículas sólidas com um meio fluido. Consulte o APÊNDICE A - Interação entre Partículas e Fluidos para melhor compreensão das referências à leis e equações.

4.1 Medidor de Concentração por Feixe de Luz

4.1.1 Equipamento

Este método utiliza basicamente um tanque de decantação, onde a amostra é colocada em suspensão, um emissor de luz paralela e uma célula fotosensível. Além disso, necessita-se de todo um aparato estrutural e elétrico para a montagem do dispositivo. Observe a montagem esquematizada abaixo.



4.1.2 Funcionamento

O feixe de luz é projetado, à uma dada altura H do tanque de decantação, através da suspensão, contra uma célula fotosensível. Assumindo uma suspensão inicialmente homogênea, a concentração das partículas no feixe de luz será a mesma que a concentração da suspensão. Conforme a decantação ocorre, a intensidade de luz que atinge a célula fotosensível vai aumentando a medida que partículas cada vez menores atravessam o feixe, vindas de cima. Então, a concentração de partículas no feixe de luz, em qualquer instante, será a concentração de partículas com diâmetro menor que D , onde D é o **Diâmetro de Stokes** dado pela equação (7) do APÊNDICE A. Pode-se mostrar que a atenuação do feixe de luz está relacionada com a área superficial projetada da partícula no feixe. O resultado da medida é uma curva da distribuição acumulada de superfície em função do diâmetro

Com a curva de distribuição acumulada de superfície em função de D , podemos obter a curva de distribuição acumulada de massa em função de D (consulte APÊNDICE B - Metodologia de Cálculo para as Soluções Possíveis).

4.1.3 Desempenho

Este método possui um limite inferior para velocidades de queda ao redor de $14 \mu\text{m} \cdot \text{min}^{-1}$, para as quais as correntes de convecção se tornam significativas. O limite superior encontra-se em velocidades de queda ao redor de $2 \text{cm} \cdot \text{min}^{-1}$ onde o escoamento deixa de ser laminar e erros significativos são introduzidos. Estes limites, contudo, abrangem satisfatoriamente as faixas desejadas para o nosso problema.

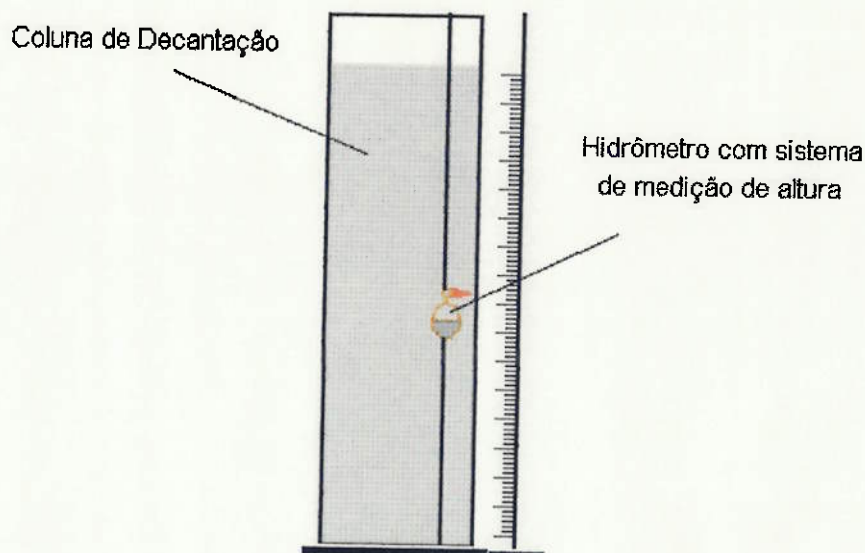
O método tem a vantagem de requerer uma pequena quantidade de particulado e, assim, aproximar-se da condição de fluxo laminar (Região de Stokes).

A versão mais poderosa deste dispositivo utiliza a centrifugação da suspensão para a medida de partículas com diâmetro inferior a $1 \mu\text{m}$. Da maneira como propomos aqui, medidas desta magnitude não são possíveis sem correções.

4.2 Hidrômetros Miniatura - Mergulhador (*Diver*)

4.2.1 Equipamento

O hidrômetro miniatura consiste de um pequeno recipiente selado que é imerso completamente em uma coluna de decantação. Além disso, necessita-se de algum aparato para a visualização da altura do hidrômetro dentro da coluna (ver figura abaixo).



4.2.2 Funcionamento

O *Diver* é preenchido de mercúrio (ou outro fluido) até possuir uma dada densidade e então é mergulhado na coluna de decantação. Ele, então, afundará até o ponto em que a densidade da suspensão seja igual a sua. Através de algum dispositivo, a altura H do *Diver* deve ser determinada. Então, a densidade da suspensão com um particulado de diâmetro D , na altura H , após tempo de decantação T , é igual à densidade do *Diver*. De posse de H e T , podemos determinar o valor do diâmetro D (Diâmetro de Stokes). O resultado da medição é uma curva de densidade em função do diâmetro. Posteriormente, transforma-se esta curva na curva desejada de porcentagem acumulada de massa em função do diâmetro (consulte o APÊNDICE B).

Note que um *Diver* fornece o valor de um ponto na curva de distribuição granulométrica. Logo precisamos de vários *Divers* para a determinação de uma curva satisfatória.

4.2.3 Desempenho

A principal dificuldade de se utilizar os *Divers* é a sua calibragem e a dificuldade de seu correto posicionamento para a leitura do valor de H . Além disso, ele não é

recomendado para distribuições granulométricas descontínuas por apresentar resultados peculiares.

Além disso há a influência da colocação e remoção do *Diver* para a leitura de H e dos métodos para sua visualização dentro da coluna de decantação. Existem alguns estudos e recomendações a respeito mas não há um consenso em torno da melhor opção.

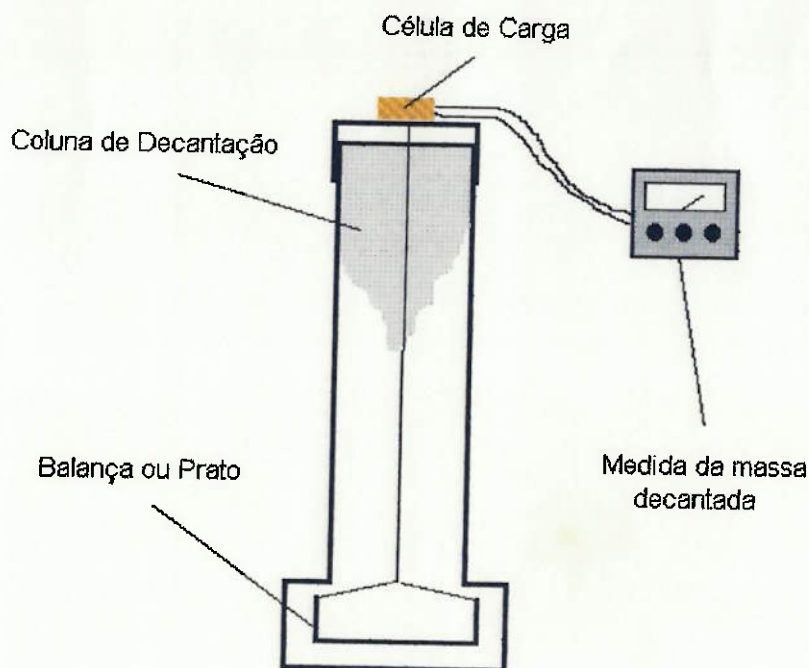
Outra questão é o fato de que o *Diver* provoca a elevação do nível da suspensão. Daí a dificuldade de se saber qual o ponto abaixo da superfície que se refere à uma determinada densidade.

Finalmente, o hidrômetro necessita de uma concentração de, pelo menos, 40 g l^{-1} para que as leituras de densidade sejam acuradas. Isto intensifica a interação entre as partículas afastando a decantação das condições ideais. Ainda, para que o *Diver* possua dimensões reduzidas, devem ser utilizados materiais pesados em seu interior como, por exemplo, mercúrio.

4.3 Balança de Decantação

4.3.1 Equipamento

O dispositivo consiste de uma coluna preenchida de um fluido adequado, onde o particulado sob a forma de uma solução do mesmo fluido é inserido. No fundo da coluna há uma balança. A balança é conectada à algum dispositivo de medição para o acompanhamento da massa decantada ao longo do tempo (ver figura abaixo).



4.3.2 Funcionamento

A coluna de decantação é inicialmente preenchida com o fluido adequado (no caso do Carbonato de Cálcio, o melhor fluido seria água). A massa de particulado é diluída

separadamente no mesmo fluido da coluna. A solução, então, é colocada no topo da coluna e é iniciada a contagem do tempo.

A massa decantada é recolhida para vários instantes de tempo. Ao final do processo, obtém-se uma curva de massa X tempo. Admitindo as hipóteses da Equação de Stokes, em cada instante, o diâmetro das partículas que acabaram de repousar sobre a balança é maior que o diâmetro de todas as partículas ainda por decantar.

De posse dos valores do tempo T e da altura da balança H , obtemos a curva de massa em função do diâmetro. Em seguida calculamos a curva de porcentagem acumulada de massa em função do diâmetro (ver APÊNDICE B).

4.3.3 Desempenho

O desempenho deste aparelho é limitado pela interação entre as partículas durante a decantação, pelo efeito de correntes de convecção, pelo efeito do movimento Browniano, pela aderência de partículas às paredes da coluna e pelo tempo necessário para a decantação de uma porcentagem suficiente de massa. Felizmente, estes efeitos tornam-se mais significativos para as partículas com diâmetro da ordem de $1\mu\text{m}$.

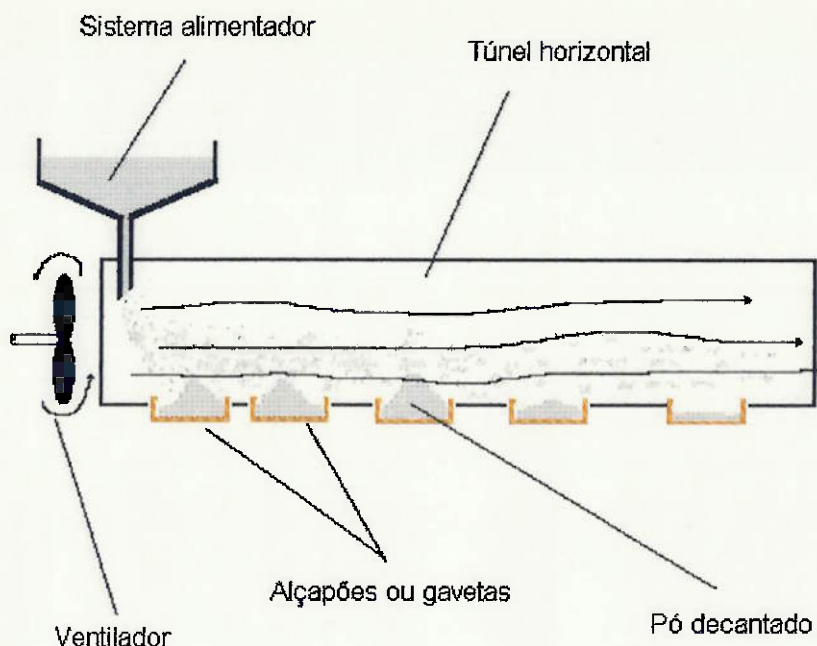
Além disso, para uma suficiente aproximação das condições ideais de decantação (Região de Stokes), uma quantidade muito pequena de particulado (menos de 0,5 g) deve ser utilizada. Isso provoca dificuldades da medição da massa decantada ao longo do tempo.

Para a medição de partículas com diâmetro da ordem de $1\mu\text{m}$, correções devem ser aplicadas.

4.4 Túnel de Decantação Horizontal

4.4.1 Equipamento

Este dispositivo consiste de um túnel horizontal dotado de "alçapões" no fundo espaçados de uma certa maneira. No início do tubo há um alimentador de particulado e um ventilador (ver figura abaixo).



4.4.2 Funcionamento

O ventilador sopra ar através do tubo com uma vazão determinada (de preferência a tornar o escoamento o mais laminar possível). O ar carrega o particulado do alimentador. Ao longo do tubo, as partículas vão alcançando o fundo em pontos diferentes, as maiores chegam ao fundo antes das menores.

Ao final de um certo tempo, a alimentação cessa e o ventilador pára. Então teremos uma distribuição de particulado ao longo do tubo em ordem decrescente de tamanho. Através dos alçapões, as massas são recolhidas e pesadas.

Após a calibragem do aparelho, para cada alçapão, em função de uma amostra com distribuição granulométrica conhecida ensaiada num processo padronizado, podemos obter a distribuição granulométrica para uma amostra qualquer.

4.4.3 Desempenho

Por funcionar com um fluxo de ar, o movimento das partículas será extremamente complexo. Daí não temos como garantir o gradiente esperado de diâmetros. Além disso, a Equação de Stokes não é válida neste caso pois há a influência de mais uma força, no sentido horizontal.

A utilização de um fluido escoando pelo tubo em regime laminar poderia solucionar o problema mas dificultaria o processo de retirada de massa para pesagem. Mesmo assim, a Equação de Stokes não poderia ser utilizada.

Além disso é necessária uma maior quantidade de particulado para a obtenção de melhores resultados.

Não encontramos nenhum estudo feito para condições semelhantes a esta de modo que os resultados deste tipo de medição só poderão ser verificados experimentalmente através de um protótipo.

4.5 Microscopia

4.5.1 Equipamento

Este método de determinação da distribuição granulométrica de um particulado consiste basicamente da observação, através de um microscópio ótico, de um slide contendo uma amostra representativa do particulado.

4.5.2 Funcionamento

Dado que o slide da amostra foi confeccionado seguindo-se uma série de regras e recomendações, o operador executa sobre o slide uma contagem das partículas segundo uma determinada dimensão observável, dependendo do tipo de partícula. No caso do Carbonato de Cálcio seria adequada a medida de um círculo tendo a mesma área que a observada.

A partir da contagem, a distribuição granulométrica pode ser determinada.

4.5.3 Desempenho

A utilização de um microscópio ótico para a contagem de partículas se presta para diâmetros superiores a $0,8\ \mu\text{m}$ e permite uma precisão entre $0,8$ e $2,3\ \mu\text{m}$. O método possui a limitação de que partículas distantes $0,25\ \mu\text{m}$ são freqüentemente vistas como uma única partícula.

A grande dificuldade deste processo está na preparação dos slides, que devem possuir uma amostra representativa e uniformemente dispersa, e na habilidade do operador.

5. SOLUÇÕES VIÁVEIS

Por serem relativamente complexas e muito dependentes do próprio projeto, as soluções possíveis apresentadas no item anterior não podem ser comparadas quantitativamente em todos os aspectos desejáveis. Por exemplo, é impossível definir qual é exatamente a precisão da distribuição granulométrica, obtida através de qualquer uma das soluções apresentadas, antes de definirmos o projeto em si. Contudo, todas as soluções podem ser comparadas qualitativamente a ponto de chegarmos a alguma conclusão de interesse para o estudo de viabilidade, sem a incorrência de erros de julgamento. Quando faltarem informações suficientes para a comparação segundo um dado aspecto, este será colocado em segundo plano até que não haja condições de definir qual a melhor solução. Neste caso, ambas as soluções serão consideradas impróprias ou não.

Como maneira de comprovarmos as análises, atribuímos uma nota variando de 0 a 10 a cada quesito de especificação e executamos uma média ponderada.

Com as informações do item anterior, montamos a tabela comparativa da página seguinte:

	por Feixe de Luz	Diver	Decantação	Túnel de Decantação Horizontal	Microscopia
Custo (peso 2)	O sistema emissor de luz paralela e o receptor fotosensível possuem custo alto. (nota : 3)	os Divers e o sistema de visualização de altura possuem custo médio ou baixo, conforme qualidade (nota : 6)	O sistema de medição de massa decantada possui custo baixo ou médio, conforme precisão. (nota : 6)	O aparato total possui custo médio se utilizar líquido e custo baixo se utilizar ar. (nota : 7)	O equipamento necessário possui custo alto ou muito alto, conforme precisão. (nota : 3)
Tamanho e Manipulação (peso 1)	Pode ser feito dentro do especificado. (nota : 10)	Pode ser feito dentro do especificado. (nota : 10)	Pode ser feito dentro do especificado. (nota : 10)	Exige um comprimento relativamente grande. (nota : 5)	Pode ser feito dentro do especificado. (nota : 10)
Substâncias Descartáveis (peso 1)	Está de acordo com o especificado, no caso do CaCO_3 (nota : 8)	Está de acordo com o especificado, a menos da substância utilizada no Diver. (nota : 7)	Está de acordo com o especificado. (nota : 8)	Está de acordo com o especificado ou não possui substâncias descartáveis. (nota : 9)	Não possui substâncias descartáveis em volume significativo. (nota : 10)
Versatilidade (peso 1)	Permite a utilização de outros tipos de particulados. (nota : 10)	Permite a utilização de outros tipos de particulados. (nota : 10)	Está de acordo com o especificado. (nota : 10)	Está de acordo com o especificado. (nota : 10)	Permite a utilização de outros tipos de particulados. (nota : 10)
Precisão (peso 3)	Boa. (nota : 8)	Boa. (nota : 7)	Média. (nota : 6)	Ruim. (nota : 4)	Boa. (nota : 8)
Operação (peso 1)	De acordo com o especificado. (nota : 10)	Requer a intervenção constante do operador. (nota : 4)	De acordo com o especificado. (nota : 10)	Requer a intervenção do operador na etapa final de retirada e pesagem de massa. (nota : 5)	Requer a atenção constante do operador. (nota : 3)
Tempo de Medição (peso 2)	Menor que o especificado (aproximadamente 20 minutos) (nota : 10)	De acordo com o especificado. (nota : 9)	De acordo com o especificado. (nota : 9)	Maiores que o especificado (contando o processo de pesagem posterior) (nota : 5)	Maiores que o especificado. (nota : 3)
Entradas e Saídas (peso 1)	De acordo com o especificado. (nota : 10)	De acordo com o especificado. (nota : 10)	De acordo com o especificado. (nota : 10)	Requer uma quantidade de particulado superior à especificada. (nota : 4)	Requer uma quantidade de particulado bem inferior à especificada. (nota : 10)
Resíduos (peso 1)	Depende do Fluido de decantação e agente dispersante. (nota : 8)	Depende do Fluido de decantação e agente dispersante. (nota : 8)	Depende do Fluido de decantação e agente dispersante. (nota : 8)	Se utilizado ar, não há resíduo, caso contrário, depende do fluido utilizado. (nota : 9)	Não há resíduos em quantidades significativas. (nota : 10)
Durabilidade (peso 1)	De acordo com o especificado. (nota : 10)	De acordo com o especificado. (nota : 10)	De acordo com o especificado. (nota : 10)	De acordo com o especificado. (nota : 10)	Maiores que a especificada. (nota : 10)

Média :

Medidor de Concentração por raio de luz :	8,3
Balança de Decantação :	8,1
Hidrômetro miniatura :	7,9
Microscopia :	7,1
Túnel Horizontal :	6,3

5.1 Comparação

5.1.1 Custo

Comparativamente, os métodos que possuem custo mais elevado são a medição de concentração por raio de luz e a microscopia. As variações entre eles dependem da qualidade do equipamento, isto é, a célula fotosensível e o circuito elétrico que a acompanha encarecem o primeiro método enquanto que a capacidade de ampliação do microscópio encarece o segundo.

Em seguida na escala de custo está o Diver pois, para que o dispositivo forneça resultados satisfatórios, os mini - hidrômetros devem ser de boa qualidade e estar bem calibrados. Fator que encarece o dispositivo é o efeito do método de visualização do Diver, dentro da coluna de decantação, sobre a medida da altura que corresponde à densidade do Diver.

Em seguida está a balança de decantação. O custo deste dispositivo está diretamente relacionado com a precisão do sistema que mede a massa sobre a balança. Como é preferível a utilização de uma pequena amostra de particulado, talvez seja necessária a precisão de 0,001 gramas na medida de massa decantada.

Por fim está o túnel horizontal que não possui nenhum dispositivo relativamente caro. Talvez o custo total seja equivalente ao da balança de decantação caso alguns elementos devam ser aperfeiçoados para melhoria de precisão.

5.1.2 Tamanho e Manipulação

O único dispositivo com tamanho fora do especificado é o túnel horizontal de decantação. Para obtermos uma quantidade suficiente de pontos na curva, precisamos do mesmo número de alçapões e quanto mais espalhadas estiverem as partículas dentro do túnel, melhor.

Todos os outros dispositivos podem ser construídos dentro dos valores especificados.

5.1.3 Substâncias Descartáveis

O dispositivo que possui maior problema com substâncias descartáveis é o hidrômetro. Como o hidrômetro deve possuir tamanho pequeno, é necessário preenchê-lo com alguma substância pesada. Na realidade, não há a necessidade de

se descartar esta substância pois ela pode ser reaproveitada em outros Divers de modo que este problema possui importância relativa.

Os métodos de túnel horizontal (no caso de utilização de ar) e microscopia não possuem substâncias a serem descartadas em quantidades significativas.

Todos os métodos, a menos da microscopia e do túnel horizontal utilizando ar, necessitam descartar a suspensão de particulado ao final do processo de medição pois é inviável a recuperação do particulado.

5.1.4 Versatilidade

Todos os dispositivos atendem à especificação

5.1.5 Precisão

A melhor precisão é obtida com os métodos de medida de concentração por feixe de luz, hidrômetro miniatura e microscopia. Cada um deles possui sua faixa de precisão dependendo do tipo de equipamento utilizado mas, de um modo geral, são equivalentes quanto a este aspecto.

Em seguida está a balança de decantação. Não que este método não possa atingir um nível de precisão equivalente aos métodos citados acima mas sim pela ambigüidade entre a necessidade de uma massa reduzida de particulado e o custo de um sistema de medição sensível o bastante.

A pior precisão fica por conta do método de túnel horizontal. Apesar de não termos encontrado nenhum estudo teórico a respeito, podemos concluir que o método é afetado por uma série de erros dada a intensa interação entre as partículas ao longo do túnel. Contudo, isto poderá ser comprovado apenas experimentalmente.

5.1.6 Operação

A especificação é atendida apenas pelos métodos de medição de concentração por raio de luz e balança de decantação pois não há a necessidade da intervenção do operador durante o processo de medição.

Um caso um pouco pior é o método do túnel horizontal pois há a necessidade da coleta de massa de cada um dos alçapões e a execução da pesagem dessas massas.

O pior caso é o método de microscopia que exige total atenção do operador durante o processo de medição.

5.1.7 Tempo de Medição

Todos os métodos atendem ao especificado com exceção dos métodos de túnel horizontal e microscopia. No caso do túnel horizontal, o tempo gasto com a pesagem das massas de cada alçapão e a montagem do gráfico pode ser reduzido através de algum procedimento eficiente. Uma solução seria implantar balanças logo abaixo de cada alçapão. Assim, a pesagem seria feita automaticamente mas, por outro lado, encareceria o projeto.

Julgamos que o tempo de medição mais longo corresponderia ao método de microscopia, dada a quantidade de contagens que devem ser feitas. Contudo, não possuímos nenhum dado estatístico que comprove nosso julgamento.

5.1.8 Entradas e Saídas

Todos os métodos atendem à especificação com exceção do método de túnel horizontal. Este método requer uma quantidade de particulado superior à especificada devido à discretização da curva imposta pela presença dos alçapões. Além disso, o efeito das interações interparticulares será menos sentido se uma maior quantidade de massa for coletada em cada alçapão.

5.1.9 Resíduos

No caso do Carbonato de Cálcio, o fluido recomendado para a suspensão é a água e o agente dispersante pode ser ou Xileno ou Pirofosfato de Sódio (em pequenas quantidades). Nesse caso, o resíduo de medição é a própria suspensão. Todos os dispositivos recaem neste problema com exceção da microscopia que não possui resíduos uma vez que os slides são armazenados.

5.1.10 Durabilidade

Todos os dispositivos atendem à especificação

Do que foi exposto acima, concluímos que o método de microscopia não se enquadra nos requisitos de maneira satisfatória por ser muito dependente do operador e utilizar um equipamento caro.

Já o método de túnel horizontal possui muitas características desejadas com exceção da precisão que, no nosso caso, é um requisito muito importante.

O método de medição de concentração por feixe de luz nada mais é do que uma simplificação dos dispositivos existentes que operam a base de raio -x. Devido ao custo destes aparelhos, acreditamos que uma versão simplificada, mesmo que possua precisão inferior, fatalmente ultrapassará o limite de custo imposto. Por isso, descartaremos esta alternativa, apesar dela ter se revelado a melhor entre todas as outras.

Então, as soluções para o problema que julgamos serem viáveis são :

- | | |
|----|-----------------------|
| 1º | Balança de Decantação |
| 2º | Hidrômetro Miniatura |

6. CONCLUSÃO

O estudo de viabilidade apresentado foi baseado totalmente nos estudos contidos na referência bibliográfica. Apesar de ser uma referência única, os estudos nela contidos são completos o suficiente para que quase todas as soluções possíveis possuíssem um bom embasamento teórico.

Quase todas as soluções possíveis apresentadas são comentadas na bibliografia em maior ou menor profundidade.

O desenvolvimento teórico apresentado em linhas gerais no APÊNDICE A é discutido extensivamente na bibliografia bem como todas as hipóteses admitidas na derivação das principais equações.

As soluções possíveis escolhidas estão dentre as mais adotadas entre os fabricantes de dispositivos de medição deste gênero e representam os métodos mais simples para o problema. Contudo, não pudemos obter maiores informações a respeito de precisão, resultados experimentais, estatísticas, custos e outros dados que nos permitissem uma análise mais quantitativa de cada solução. Mesmo assim, acreditamos que as comparações feitas resultaram nas duas soluções viáveis mais adequadas à nossa necessidade.

Na segunda parte deste projeto, o Projeto Básico, uma solução, dentre as duas viáveis será escolhida e o projeto será desenvolvido completamente. As leis envolvidas serão melhor estudadas e as equações serão apresentadas em todo o seu rigor.

APÊNDICE A - INTERAÇÃO ENTRE PARTÍCULAS E FLUIDOS

Como muitos métodos de determinação da distribuição granulométrica de um particulado utilizam uma suspensão deste em um dado fluido, é muito importante o conhecimento do comportamento das partículas sólidas imersas em um fluido sob a ação de um campo gravitacional.

O equacionamento abaixo não segue o rigor nem fornece todas as informações disponíveis na literatura atual a respeito do assunto. Contudo, ele esclarece os principais conceitos envolvidos e apresenta as relações mais importantes para esta etapa da análise. Para uma apresentação mais rigorosa, consulte a Referência Bibliográfica.

Modelo Físico

O desenvolvimento das equações que são utilizadas na prática para a determinação de distribuições granulométricas partem de um modelo físico simplificado. Trata-se do comportamento de uma partícula sólida de formato esférico decantando em um fluido de extensão infinita. Os estudos realizados sobre este modelo revelam a existência de uma relação única entre o **coeficiente de arraste** sobre a partícula e o **número de Reynolds**. Desta relação derivou-se a chamada **Equação de Stokes** que se aplica para pequenos números de Reynolds e que relaciona a velocidade de decantação da partícula com o seu diâmetro.

Relação entre Coeficiente de arraste e número de Reynolds

Da análise dimensional aplicada ao problema, sob condições de equilíbrio, obtém-se uma relação única entre os dois adimensionais :

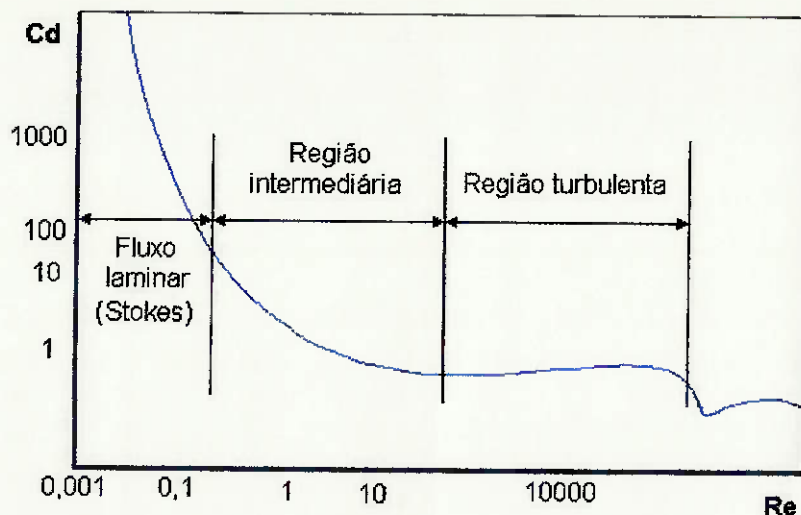
$$\text{Nº Reynolds} \quad \boxed{Re = \frac{\rho_f u D}{\eta}} \quad (1) \quad \text{Coeficiente de arraste} \quad \boxed{Cd = \frac{Fd}{\frac{D^2 \cdot \rho_f u^2}{4} \cdot \frac{1}{2}}} \quad (2)$$

onde ρ_f é a densidade do fluido, u é a velocidade de queda, D é o diâmetro da partícula, η é a viscosidade do fluido. F_d é a força de arraste dada pela equação :

$$\boxed{F_d = \frac{\pi}{6} \cdot (\rho_s - \rho_f) g D^3} \quad (3)$$

onde ρ_s é a densidade da esfera e g é a aceleração da gravidade

A relação experimental entre Re e Cd é mostrada graficamente abaixo



C_d = Coeficiente de arraste

Re = Número de Reynolds

A região laminar é também chamada região de Stokes pois é dentro dela que a Equação de Stokes se faz válida, isto é, para $Re < 0,2$.

Equação de Stokes

Stokes deduziu que, quando a partícula atinge uma velocidade constante de queda (velocidade terminal), o arraste agindo sobre a partícula é devido unicamente à forças viscosas. Deduziu, então, a seguinte fórmula:

$$F_d = 3 \pi D \eta u_{st} \quad (4) \quad \text{onde } u_{st} \text{ é a velocidade terminal na região de Stokes}$$

Substituindo na equação (3), obtemos a Equação de Stokes :

$$u_{st} = \frac{(\rho_s - \rho_f) g D^2}{18 \eta} \quad (5)$$

Diâmetro de Stokes

Define-se diâmetro de queda livre (*free falling diameter*) como o diâmetro da esfera cuja velocidade terminal de queda é igual à velocidade da partícula considerada sob as mesmas condições de decantação. Na região de Stokes, este diâmetro é referido como Diâmetro de Stokes e será amplamente utilizado nos métodos de medição granulométrica.

O Diâmetro de Stokes é obtido igualando-se as equações (3) e (4) e isolando-se D :

$$D_{st} = \sqrt{\frac{18 \eta u_{st}}{(\rho_s - \rho_f) g}} \quad (6)$$

A equação do Diâmetro de Stokes é utilizada substituindo-se a velocidade de queda u_{st} por h/t que representa o espaço percorrido pela maior partícula (com diâmetro D_{st}) da superfície até a altura h no intervalo de tempo t . Então a equação fica :

$$D_{st} = \sqrt{\frac{18 \eta h}{(\rho_s - \rho_f) g t}} \quad (7)$$

Diâmetro Crítico

Uma questão fundamental é : Qual o maior diâmetro admissível para a validade da Equação de Stokes?

Este diâmetro é chamado diâmetro crítico e é obtido fazendo-se $Re=0,2$ e eliminando u das equações (1) e (5) :

$$D_{st}^3 = \frac{3,6 \eta^2}{(\rho_s - \rho_f) \rho_f g}$$

Vamos calcular o diâmetro crítico para o caso de uma partícula de Carbonato de Cálcio decantando em água :

$$\rho_s = 2700 \text{ kg m}^{-3}$$

$$\rho_f = 1000 \text{ kg m}^{-3}$$

$$D_{st} = 59,9 \text{ } \mu\text{m}$$

$$g = 9.81 \text{ ms}^{-2}$$

$$\eta = 0,001 \text{ N s m}^{-2}$$

Outro aspecto apresentado na literatura é o equacionamento para a obtenção do tempo e do espaço percorrido pela partícula até esta atingir sua velocidade terminal constante. Observa-se que, para uma partícula de quartzo (cujas densidade se aproxima muito da do Carbonato de Cálcio) de $50 \text{ } \mu\text{m}$ de diâmetro decantando em água, sua velocidade terminal é atingida em $1,7 \text{ ms}$. Logo, admitir que uma partícula partindo do repouso atinge sua velocidade terminal instantaneamente não contribui para a introdução de erros apreciáveis na região de Stokes.

Concentração e Diâmetro

A grande arma na análise dimensional de particulados é a Equação de Stokes. Se as condições que garantem sua validade são satisfeitas, metade do trabalho está resolvido. A outra metade do trabalho está relacionada com a concentração da suspensão em uma dada altura da coluna de decantação (problema da esfera proposto originalmente) após um dado intervalo de tempo.

Se a concentração é monitorada a uma profundidade fixa abaixo da superfície, para uma suspensão homogênea de esferas, esta permanecerá constante até que a maior das partículas decante da superfície até o ponto de monitoramento. A concentração, então, irá decrescer sendo proporcional, em qualquer instante, à concentração de partículas com diâmetro menor que D , para aquele intervalo de tempo e para aquela altura de queda; e D é o diâmetro de Stokes.

Qualquer amostra retirada daquela altura não deve conter nenhuma partícula com diâmetro maior que o diâmetro de Stokes. Na prática, contudo, a situação não é tão simples.

A metodologia de aplicação de todo esse equacionamento ficará mais clara ao analisarmos cada uma das soluções possíveis para o problema.

Variação da concentração dentro da coluna de decantação

A concentração à uma dada altura h , abaixo da superfície, no instante inicial é:

$$C(h,0) = \frac{\text{massa de sólidos}}{\text{volume de sólidos} + \text{volume de líquido}} = \frac{msh}{vsh + vh}$$

A concentração após um intervalo de tempo t é:

$$C(h,t) = \frac{msh'}{vsh' + vh} \quad \text{onde } msh' \text{ é a massa de sólido e } vsh' \text{ é o volume do sólido contido num volume } vh \text{ de fluido (da superfície até a altura } h), \text{ decorrido o tempo } t.$$

Admitindo que a diferença entre vsh' e vsh é pequena comparada com vh , o volume total até a altura h permanece constante ao longo do tempo. Então :

$$\frac{C(h,t)}{C(h,0)} = \frac{msh'}{msh} \quad (8)$$

Portanto, basta plotarmos a curva de $C(h,t)/C(h,0)$ para obtermos a curva de massa acumulada em função do tempo.

Relação entre gradiente de densidade e concentração

Chamando de $D(h,t)$ a densidade da suspensão à profundidade h após o tempo t :

$$D(h,t) = \frac{ms'}{vs'} + \frac{mf}{vf} = \rho_s + \frac{\rho_s - \rho_f}{\rho_s} \cdot C(h,t)$$

onde ρ_s e ρ_f são a densidade do sólido e a densidade do líquido respectivamente.

Além disso :

$$D(h,0) = \rho_s + \frac{\rho_s - \rho_f}{\rho_s} \cdot C(h,0)$$

Portanto :

$$\frac{C(h,t)}{C(h,0)} = \frac{D(h,t) - \rho_f}{D(h,0) - \rho_f} \quad (9)$$

Logo, basta plotarmos $(D(h,t) - \rho_f) / (D(h,0) - \rho_f)$ para obtermos a curva de porcentagem acumulada de massa.

APÊNDICE B - METODOLOGIA DE CÁLCULO PARA AS SOLUÇÕES POSSÍVEIS

Medidor de Concentração por feixe de luz

A teoria da técnica de fotosedimentação está apresentada no livro da referência bibliográfica no item 9.1. Nela é definida a densidade ótica em função da intensidade do feixe de luz que atinge a célula fotosensível. Na seqüência demonstra-se a equação da área superficial projetada em função da variação da densidade ótica (equação 9.12). Por fim, demonstra-se a equação relacionando a massa acumulada com a variação de densidade ótica (equação 9.13).

Experimentalmente, para obtermos a distribuição granulométrica de uma amostra através deste método deve-se proceder da seguinte maneira :

- 1- Determinação de uma escala de tempo adequada e cálculo da respectiva escala de diâmetros , com os valores de t , h e a equação do diâmetro de Stokes (equação (7)).
- 2- Cálculo da densidade ótica para os valores de t , a partir da variação da intensidade de luz que chega à célula fotosensível.
- 3- A partir da curva de densidade ótica em função do diâmetro, obter a curva de porcentagem acumulada de massa.

Hidrômetro Miniatura

Para a obtenção da distribuição granulométrica através deste método, proceder da seguinte maneira :

- 1- Montagem de uma escala de tempo adequada.
- 2- Mergulhar o primeiro hidrômetro no instante t_0 e anotar o valor da altura
- 3- Com o valor da altura e do tempo, calcular o diâmetro através da equação de Stokes (7).
- 4- Com o valor da densidade do hidrômetro, calcular a porcentagem acumulada de massa (equação (9)).
- 5- Utilizando outros hidrômetros, repetir os passos 3 e 4 para os outros intervalos de tempo.

Balança de Decantação

Para a obtenção da distribuição granulométrica através deste método, proceder da seguinte maneira :

- 1- Determinação de uma escala de tempo adequada e cálculo da respectiva escala de diâmetros , com os valores de t , h e a equação do diâmetro de Stokes (equação (7)).
- 2- Para cada instante, medir a massa decantada (acumulada).
- 3- Com o valor da massa total de particulado, plotar a curva de porcentagem acumulada de massa.

Túnel Horizontal

Para a obtenção da distribuição granulométrica através deste método, proceder da seguinte maneira :

- 1- Calibrar o túnel com uma amostra com distribuição granulométrica conhecida. Assim, obteremos uma faixa de diâmetros coletada por cada alçapão num dado procedimento experimental padronizado.
- 2- Executar a experiência com a amostra a ser medida
- 3- Pesar a massa contida em cada alçapão
- 4- Plotar a curva desejada com o diâmetro nas abcissas (pré determinado na calibragem) e o valor da porcentagem acumulada de massa nas ordenadas (admitindo uma distribuição decrescente de diâmetro ao longo dos alçapões.

Microscopia

Através deste método, a curva de porcentagem acumulada de massa em função do diâmetro pode ser obtida diretamente da contagem das partículas.

APÊNDICE C - CRONOGRAMA DE ATIVIDADES

Para o segundo semestre de 1994, o cronograma de atividades é :

- Agosto -** Escolha da solução a ser desenvolvida, padronização do procedimento experimental, desenvolvimento teórico completo e metodologia de cálculo, pré-análise de desempenho através de um protótipo rudimentar e início do projeto do dispositivo.
- Setembro -** Fim do projeto do dispositivo e início da construção. Inclusão das alterações necessárias decorrentes da pré-análise de desempenho. Início da confecção do documento a ser apresentado, manual de operação, etc.
- Outubro -** Fim da construção do dispositivo e início das análises estatísticas da precisão. Início dos estudos de correções matemáticas para medidas de diâmetro ao redor de $1\mu\text{m}$.
- Novembro -** Fim das análises da precisão. Início da confecção de softwares de processamento de dados.
- Dezembro -** Fim da confecção de softwares e de todos os documentos necessários. Entrega do projeto.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] ALLEN, T. (1975), *Particle Size Measurement*, 2nd Edition, Chapman and Hall Ltda, London.

Escola Politécnica da Universidade de São Paulo
Departamento de Engenharia Mecânica

PMC - 581 PROJETO MECÂNICO II

PARTE 2

PROJETO BÁSICO

ÍNDICE

1.	Escolha da Solução	3
1.1	Hidrômetros Miniatura	3
1.2	Balança de Decantação	3
1.3	Comparação Entre as Soluções	3
2.	Modelo Físico	6
3.	Modelo Matemático	7
3.1	Interação Entre Partículas e Fluidos	8
3.2	Método Experimental	10
4.	Análise de Sensibilidade	13
5.	Análise de Compatibilidade	14
6.	Análise de Estabilidade	14
7.	Otimização Formal	15
7.1	Especificação dos Parâmetros de Projeto	17

1. ESCOLHA DA SOLUÇÃO

Nesta primeira etapa do Projeto Básico, escolheremos a melhor solução para o problema proposto, dentre aquelas consideradas viáveis ao final do Estudo de Viabilidade executado na primeira parte. Para tanto, utilizaremos a matriz de decisão do Estudo de Viabilidade. Antes, porém, faremos um rápido resumo das duas soluções viáveis escolhidas e seus respectivos princípios de funcionamento.

1.1 Hidrômetros Miniatura

O hidrômetro miniatura é um pequeno bulbo que possui densidade muito bem conhecida. Este bulbo é, então, imerso na suspensão do pó cuja curva granulométrica desejamos levantar. Em condições ideais, o bulbo irá afundar até atingir uma altura onde a densidade da suspensão seja igual à sua. Quando o hidrômetro tiver sua altura estabilizada, devemos medi-la e anotarmos o tempo decorrido desde o início da decantação.

De posse desses três dados: densidade do hidrômetro, tempo, altura e com o equacionamento desenvolvido no Apêndice A do Estudo de Viabilidade (este equacionamento será repetido mais adiante), podemos determinar o diâmetro da menor partícula decantada até aquele instante e a respectiva percentagem acumulada de massa de granulado decantada.

Utilizando n hidrômetros com densidades diferentes, podemos plotar n pontos na curva de distribuição granulométrica.

1.2 Balança de Decantação

A balança de decantação é constituída de um prato de balança imerso em um fluido isento de granulado. Sobre este prato, localiza-se uma coluna de decantação com uma solução homogênea do particulado. Quando do início da contagem do tempo, o particulado é liberado para decantar sobre o prato de balança.

Para intervalos de tempo conhecidos, anota-se a massa em repouso sobre o prato. Assim, utilizando a equação do diâmetro de Stokes (ver item Modelo Matemático, adiante), podemos determinar a curva granulométrica da amostra em suspensão.

1.3 Comparação entre as soluções

1.3.1 Custo

Conforme tentamos nos aproximar das condições ideais que tornam válida a equação de Stokes, elevamos o custo do equipamento utilizado. No caso do Diver (hidrômetro), as condições ideais implicam na calibração perfeita do bulbo, no mínimo de perturbação durante a colocação e retirada do bulbo, na utilização de pequena massa de granulado, na ausência de atritos no sistema de visualização do bulbo e na garantia de precisão deste sistema.

No caso da balança de decantação, podemos citar : pequena massa de granulado e, por consequência, grande sensibilidade da balança de medição de decantado.

Sob o ponto de vista de custo do equipamento, ambas as soluções se equivalem quando pensamos em condições ideais. Contudo, o custo operacional do Diver pode ser maior pois é freqüente a necessidade de recalibração do bulbo e a manipulação do aparelho deve ser mais cuidadosa.

Pelo fato de que a responsabilidade pela medida está grandemente concentrada sobre o sistema de medição de massa decantada, acreditamos que o método de balança de decantação oferece uma solução economicamente mais interessante.

1.3.2 Tamanho e Manipulação

Ambas soluções consistem, sob o ponto de vista de tamanho e manipulação, de uma coluna de decantação com um sistema de medição agregado. De modo geral, são equivalentes quanto a este quesito.

1.3.3 Substâncias Descartáveis

A substância descartável mais óbvia, que é a própria suspensão de CaCO_3 , está presente em ambas as alternativas. Além dela, há o fluido (ou outra substância) utilizado no interior do Diver e a substância utilizada em sua calibração (pequena quantidade), que podem ou não necessitar substituição.

Portanto, o método de balança de decantação possui pequena vantagem segundo este aspecto.

1.3.4 Versatilidade

O desenvolvimento das equações utilizadas na determinação da distribuição da granulometria de uma amostra de particulado permite adaptação para outros tipos de partículas que, quando em suspensão num fluido sob a ação do campo gravitacional terrestre, podem ser representados pelo modelo de uma esfera em decantação (ver Modelo Físico, adiante). Portanto, sob tal aspecto, ambas as soluções são equivalentes.

1.3.5 Precisão

Considerando apenas o dispositivo, ambas as soluções possuem precisão equivalente. Do lado do Diver, assumindo que o bulbo esteja perfeitamente calibrado, apenas o sistema de visualização contribui para a introdução de imprecisões de medida. Contudo, admitindo a utilização de uma amostra suficientemente pequena, a visualização do bulbo não deve ser tão prejudicada a ponto de necessitar-se de um sistema de visualização muito sofisticado.

Com relação ao método de balança de decantação, a necessidade de uma amostra pequena gera um problema sério que está relacionado com a sensibilidade do sistema de medição da massa de decantado. Sob condições ideais, a balança deveria ser sensível à uma variação de, pelo menos, 0,01 g de decantado sobre o prato. Como há relação íntima entre custo e precisão, neste caso, o método pode ter sua precisão reduzida em virtude do alto custo.

Agora, se considerarmos a operação do aparelho, a situação se inverte. O método do Diver requer a intervenção constante do operador para a colocação e remoção dos sucessivos bulbos calibrados. Dependendo do operador, pode ocorrer a introdução de erros significativos na medida. Já o método da balança de decantação está mais de acordo com o especificado : uma vez iniciada a decantação, o operador necessita, apenas, acompanhar a medida da massa decantada e cronometrar o seu respectivo tempo.

Por considerarmos a dependência da intervenção humana durante a medida um fator muito importante, julgamos que o método de balança de decantação atende melhor às especificações segundo o critério precisão.

1.3.6 Operação

Como dito anteriormente, o método do Diver requer a intervenção constante do operador durante o processo de medição e o método de balança de decantação é livre deste inconveniente. Por esse motivo, operacionalmente, o método da balança de decantação é preferível.

1.3.7 Tempo de Medição

O tempo de medição do método do Diver é afetado, basicamente pela habilidade do operador e pelo tempo de acomodação do bulbo no interior da coluna de decantação. No caso da balança de decantação, a necessidade da utilização de uma pequena massa de particulado eleva muito o tempo de medição. Para resolver este problema foram projetadas colunas de decantação que operam em rotação para que a "força centrífuga" acelere a medida de partículas muito pequenas.

Por isso, acreditamos que o método do Diver oferece uma medida satisfatória em um tempo menor.

1.3.8 Entradas e Saídas

Ambas as soluções necessitam, como entrada, uma certa massa de granulado em suspensão num dado fluido e fornecem, como saída, uma tabela de dados para posterior processamento. Segundo este aspecto, ambas as soluções se equivalem.

1.3.9 Resíduos

Uma vez que a massa de CaCO_3 utilizada na medição não é recuperada, ambas as soluções possuem pelo menos este resíduo em comum.

Da mesma maneira, o agente dispersante utilizado na coluna de decantação é o mesmo para ambas as soluções.

Portanto, desprezando-se resíduos decorrentes de acidentes, ambas as soluções se equivalem segundo este aspecto.

1.3.10 Durabilidade

Podemos dizer, a princípio, que ambas as soluções possuem a durabilidade especificada.

1.3.11 Conclusão

Do que foi exposto anteriormente, podemos concluir que, em linhas gerais, o método de **Balança de Decantação** possui um conjunto de características que melhor atende às especificações. Por isso, este será o método a ser desenvolvido como solução para o problema especificado no Estudo de Viabilidade.

2. MODELO FÍSICO

Todos os dispositivos que se destinam à análise de granulometria desenvolvidos até hoje, baseiam-se em um modelo matemático (que será visto em seguida). Este, por sua vez, foi desenvolvido a partir de um modelo físico que tem como arcabouço o fenômeno da interação entre uma partícula esférica uniforme e um fluido, sob a ação do campo gravitacional terrestre. Este fenômeno foi escolhido para a construção do modelo físico por ser diretamente afetado pela grandeza que pretendemos analisar : o tamanho da partícula.

A palavra tamanho não se refere a uma única grandeza associada à uma partícula. O tamanho de uma partícula pode ser o seu diâmetro, se ela for esférica; pode ser o diâmetro do círculo com a mesma área projetada da partícula, o diâmetro da esfera com o mesmo volume da partícula ou outro tipo de dimensão. No nosso caso, entenderemos como tamanho, o diâmetro de uma esfera homogênea que possui a mesma velocidade de decantação que a partícula, sob as mesmas condições experimentais, conhecido como Diâmetro de Stokes (veja a figura abaixo).

Tamanho do cristal = Diâmetro de Stokes

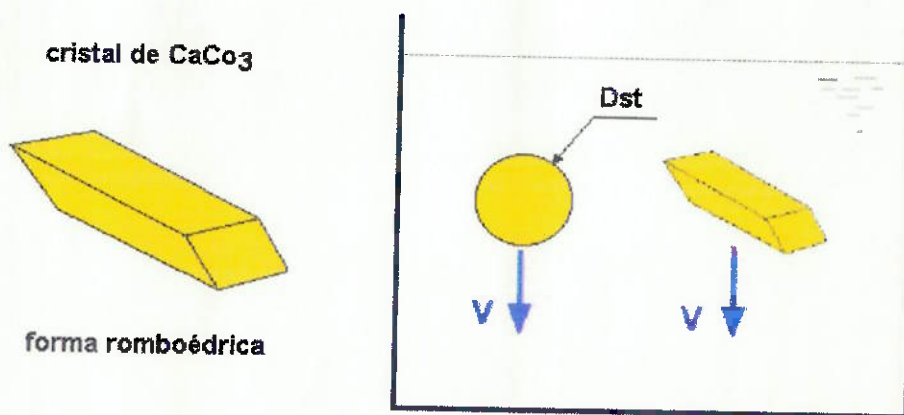


Figura 1

O modelo é muito simples : considere uma esfera com propriedades físicas bem determinadas imersa em um fluido de extensão infinita, ambos sob a ação do campo gravitacional terrestre. Nestas condições, o fluido pode escoar ao redor da esfera num fluxo laminar ou turbulento conforme as propriedades físicas de cada um, e o diâmetro da esfera (veja a figura abaixo).

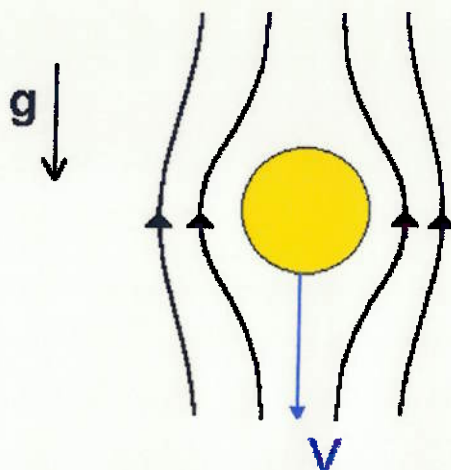


Figura 2

A respeito deste modelo, já podemos visualizar algumas incompatibilidades com a realidade :

- As partículas de CaCO_3 são admitidas esféricas. Isto não é verdade pois os cristais de Carbonato de Cálcio possuem forma romboédrica semelhante à um paralelepípedo inclinado. Esta forma afeta sua velocidade pois os cristais tendem a se orientarem de forma a promover a maior resistência à decantação.
- As partículas devem estar dispersas no fluido de modo que uma não interfira na outra. Como veremos adiante, este é um dos principais fatores que dificultam o levantamento da distribuição granulométrica de uma amostra de Carbonato de Cálcio com razoável precisão.
- O fluido não deve sofrer variação de temperatura. Na realidade, sempre existem correntes de convecção dentro de uma coluna de decantação devido à dissipação de calor através das paredes da coluna. Essas correntes afetam o deslocamento das partículas menores (ao redor de $1\mu\text{m}$).
- O fluido deve ter extensão infinita. Isto é impossível de se conseguir na prática mas a coluna de decantação pode ser dimensionada de tal forma que os efeitos das paredes sobre o movimento das partículas seja desprezível.

Com o desenvolvimento do modelo matemático poderemos analisar melhor estes inconvenientes e especificar critérios de projeto com o intuito de minimizá-los ao máximo.

3. MODELO MATEMÁTICO

O passo seguinte é, de posse do modelo físico, determinarmos equações matemáticas, regras empíricas ou dados experimentais que permitam a determinação

da curva granulométrica de uma amostra de particulado. Como veremos a seguir, as informações levantadas ao longo dos anos por inúmeras pessoas têm sido de fundamental importância para o projeto de todos os equipamentos destinados à análise granulométrica em utilização atualmente. Como o modelo físico utilizado é muito simples, o modelo matemático resultante é extremamente objetivo e igualmente simples. A principal dificuldade está na utilização, tecnologicamente falando, do modelo matemático com todas as suas hipóteses garantidas.

Iniciaremos a construção do modelo matemático estudando as leis que regem a interação entre partículas sólidas imersas em fluidos, sob a ação da gravidade.

3.1 INTERAÇÃO ENTRE PARTÍCULAS E FLUIDOS

O estudo da decantação de uma partícula esférica homogênea imersa em um fluido viscoso de extensão infinita, ambos sob a ação da gravidade, revelou uma relação única entre o fator de arraste e o número de Reynolds. Esta relação recai na conhecida equação de Stokes que se aplica à pequenos números de Reynolds e que relaciona a velocidade de decantação com o diâmetro da partícula.

Uma partícula decantando sob tais condições sofre a ação de três forças: a força gravitacional W agindo para baixo, o empuxo U agindo para cima e a força de arrasto F_d agindo para cima. A equação do movimento resulta:

$$mg - m'g - F_d = m \frac{du}{dt} \quad (1)$$

onde m é a massa da partícula, m' é a massa de fluido com o mesmo volume da partícula, u é a velocidade da partícula e g é a aceleração da gravidade.

Quando a velocidade terminal é atingida, isto é, quando $du/dt=0$:

$$F_d = (m - m')g \quad (2)$$

Para uma partícula de diâmetro D e densidade ρ_s decantando em um fluido de densidade ρ_f , a equação fica:

$$F_d = \frac{\pi}{6} (\rho_s - \rho_f) g D^3 \quad (3)$$

A análise dimensional do problema geral do movimento de uma partícula sob condições de equilíbrio mostra que há uma relação única entre o número de Reynolds e o coeficiente de arrasto C_d :

$$C_d = \frac{F_d}{\frac{D^2}{4} \rho_f \frac{u^2}{2}} \quad (4)$$

e

$$Re = \frac{\rho_f u D}{\eta} \quad (5)$$

A relação experimental entre estes dois adimensionais é mostrada na Figura 3. Note que o gráfico é dividido em três regiões: região de fluxo laminar (ou região de Stokes), região intermediária e região turbulenta.

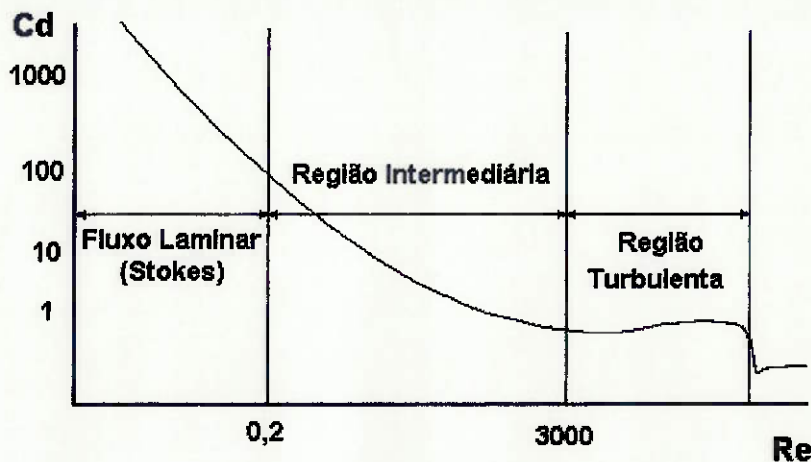


Figura 3

Stokes assumiu que, quando uma partícula esférica atinge uma velocidade constante, o arrasto sobre ela é devido totalmente às forças viscosas dentro do fluido e deduziu a seguinte expressão :

$$F_d = 3\pi D\eta u_{st} \quad (6)$$

onde u_{st} é a velocidade na região de Stokes.
Substituindo na equação (3) resulta :

$$u_{st} = \frac{(\rho_s - \rho_f)gD^2}{18\eta} \quad (7)$$

Novamente, as hipóteses assumidas na derivação da equação de Stokes são:

- 1- A partícula deve ser esférica.
- 2- O fluido deve ter extensão infinita.
- 3- A velocidade terminal deve ser atingida.
- 4- A velocidade de decantação deve ser baixa de modo que os efeitos inerciais sejam insignificantes.
- 5- O fluido deve ser homogêneo em comparação com o tamanho da partícula.

A relação entre C_d e Re pode ser obtida das equações (4), (5) e (6) :

$$C_d \cdot Re = 24 \quad (8)$$

A equação de Stokes (equação (7)) pode ser, portanto, utilizada para Números de Reynolds da ordem de 0,2.

A esta altura podemos levantar uma questão importante: Qual o maior tamanho de uma dada partícula que ainda torna válida a equação de Stokes?

Diâmetro Crítico

Chamando tal diâmetro de D_{st} , fazendo $Re=0,2$ e eliminando u das equações (5) e (7) :

$$D_{st}^3 = \frac{3,6\eta^2}{(\rho_s - \rho_f)\rho_f g} \quad (9)$$

Como exemplo, calculemos o diâmetro crítico para uma partícula de Carbonato de Cálcio decantando em água.

$$\rho_s = 2650 \text{kgm}^{-3}$$

$$\rho_f = 1000 \text{kgm}^{-3}$$

$$g = 9,81 \text{ms}^{-2}$$

$$\eta = 0,001 \text{Nsm}^{-2}$$

$$D_{st} = 60,6 \mu\text{m}$$

Podemos ver que o diâmetro limite está acima da faixa que estamos considerando neste projeto ($1\mu\text{m}$ até $20\mu\text{m}$).

Velocidade Terminal

Uma das hipóteses da equação de Stokes diz que a partícula deve atingir sua velocidade terminal. O tempo necessário para que uma partícula esférica atinja 99% da sua velocidade terminal é dado pela equação abaixo:

$$t = \frac{4,6D^2\rho_s}{18\eta} \quad (10)$$

Decantando em água, uma partícula de $50 \mu\text{m}$ de Carbonato de Cálcio levará 1,7 ms para atingir sua velocidade terminal. Logo, desprezaremos o espaço percorrido pela partícula, durante este intervalo de tempo, no projeto do dispositivo.

3.2 MÉTODO EXPERIMENTAL

Agora vamos deduzir a expressão que fornece o diâmetro de uma partícula em função de parâmetros experimentais. Para isso, observe a Figura 4. Ela mostra uma coluna de decantação preenchida com uma solução homogênea de uma amostra do particulado. Suponhamos que todas as hipóteses da equação de Stokes estejam

garantidas e que, no instante inicial do experimento, todas as partículas estão em repouso.

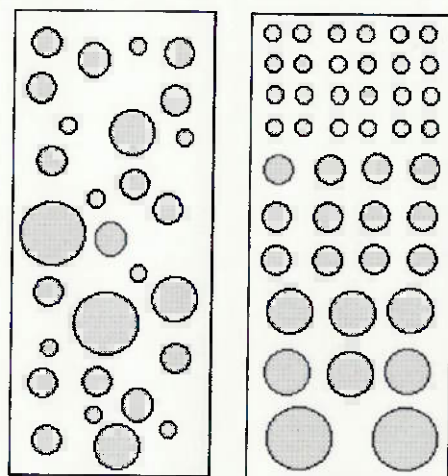


Figura 4

Se pudermos monitorar a concentração à uma dada profundidade, durante o processo de decantação, verificaremos que esta permanecerá constante até que a maior partícula presente na suspensão tenha decantado, do topo da coluna, até o ponto de monitoração. Ela, então, irá decrescer proporcionalmente à concentração de partículas com diâmetro menor que o diâmetro de Stokes (dado pela equação de Stokes), para aquela profundidade e tempo de decantação.

Idealmente, qualquer amostra retirada da zona de monitoração (ou acima) não deverá conter partículas com diâmetro maior que o diâmetro de Stokes.

Adaptando o modelo ao nosso caso, suponha que na zona de monitoração haja um prato conectado à uma balança de modo que possamos medir a massa de particulado decantado. Além disso, quando "iniciarmos a decantação", acionaremos um cronômetro.

Considerando uma dada partícula que decanta desde a superfície até o prato (percorrendo uma altura h) num intervalo de tempo t , podemos calcular sua velocidade, que foi suposta constante desde o início da decantação:

$$u = \frac{h}{t}$$

Substituindo u na equação (7) e isolando D_{st} :

$$d_{st} = \sqrt{\frac{18\eta h}{(\rho_s - \rho_f)gt}} \quad (11)$$

Esta equação nos permite levantar uma curva relacionando porcentagem de massa decantada (obtida através da balança) e diâmetro da partícula (obtida com o tempo de decantação, dados experimentais e a equação (11)).

A curva obtida desta maneira para uma coluna de decantação inicialmente preenchida com a solução do particulado deve ser corrigida pelo fato de que as partículas não iniciam a decantação no mesmo nível, isto é, algumas partículas pequenas que iniciam a decantação próximas do prato, o atingirão antes de algumas partículas grandes que começam no topo da coluna.

A teoria descrita abaixo foi desenvolvida por Oden e modificada por Bostock [1].

Considere uma distribuição da forma $W=f(D)$ onde W é a porcentagem de particulado possuindo diâmetro maior do que D . O peso percentual P que decantou no tempo t é feito de duas partes: uma consiste de todas as partículas com uma velocidade de decantação maior do que Dt (dado pela equação de Stokes) onde Dt é o tamanho da partícula que tem velocidade h/t . A outra parte consiste das partículas menores que Dt que decantaram porque iniciaram em algum ponto intermediário na coluna. Se a velocidade de uma dessas partículas menores é v , a fração das partículas deste tamanho que decantou no tempo t é igual a vt/h , resultando :

$$P = \int_{D_t}^{D_{máx}} f(D) dD + \int_{D_{mín}}^{D_t} \frac{vt}{h} f(D) dD$$

Diferenciando com relação ao tempo e multiplicando por t :

$$t \frac{dP}{dt} = \int_{D_{mín}}^{D_t} \frac{vt}{h} f(D) dD$$

logo,

$$P = W + t \frac{dP}{dt}$$

É preferível, no entanto, usar esta equação na forma sugerida por Gaudin, Schumann e Schlechter [1]:

$$\boxed{W = P - \frac{dP}{d \ln t}} \quad (12)$$

onde W é a porcentagem de massa com diâmetro acima de Dt .

Desde que P e t são conhecidos, é possível determinar W usando esta equação. Vários métodos foram sugeridos para facilitar sua solução. Um deles é plotar P em função de $\ln t$ e traçar tangentes (ver Figura 5). O ponto onde a tangente corta a linha de ordenadas uma unidade de $\ln t$ menor do que o ponto a partir do qual é traçada, fornece o valor de W .

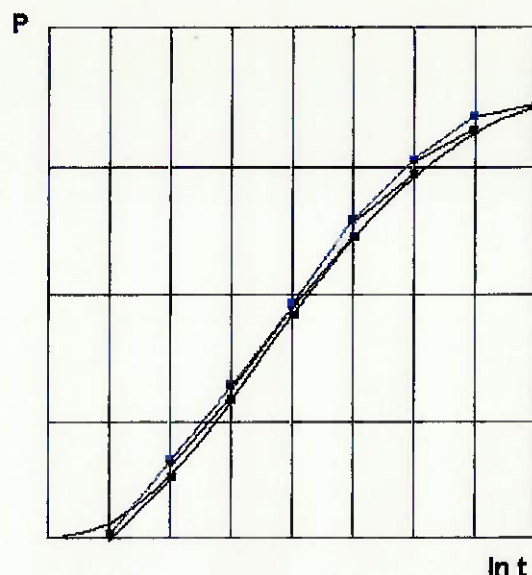


Figura 5

Assim, o modelo matemático do problema é composto basicamente de duas equações : a equação (11) que fornece o diâmetro da partícula em função da altura de decantação e do tempo de decantação, e a equação (12) que corrige a curva obtida com a leitura da massa decantada em cada um dos instantes.

4. ANÁLISE DE SENSIBILIDADE

Observando a equação do diâmetro de Stokes (11), podemos concluir algumas coisas a respeito do comportamento do modelo matemático com relação à variação de seus parâmetros. Invariavelmente, todos os parâmetros afetam o modelo de modo a torná-lo mais ou menos sensível para uma certa faixa de diâmetros de partículas:

- A aceleração da gravidade g é constante e, portanto, não afeta a sensibilidade do modelo.
- Quanto maior a altura de decantação h , maior será o diâmetro mensurável pelo aparelho, num mesmo intervalo de tempo t . Este parâmetro deve ser escolhido levando-se em consideração a especificação técnica do projeto para o tempo de medição. Deverão ser consideradas ainda, a faixa de diâmetros a ser medida pelo aparelho e a concentração recomendada para a solução do particulado.
- Quanto maior o tempo de decantação t , menores serão os diâmetros mensuráveis pelo aparelho. Este parâmetro é imposto pela especificação do projeto para o tempo de medição. No entanto, sabe-se que o tempo necessário para a decantação de 80% de uma amostra com diâmetros próximos de $1\mu\text{m}$ é extremamente elevado de modo que o tempo de decantação t afeta drasticamente o desempenho do aparelho.

- O coeficiente de viscosidade dinâmica afeta a sensibilidade da mesma maneira que a altura de decantação h : quanto maior, maior a faixa de diâmetros mensurável pelo aparelho. No nosso caso, a água seria o fluido ideal para preencher a coluna pois não é tóxico, não é caro, é de fácil reposição, é um bom agente dispersante para o Carbonato de Cálcio e não dissolve o mesmo.

- A densidade da partícula é fixa pois estamos lidando, a princípio, com apenas um material.

- A densidade do fluido está amarrada com o coeficiente de viscosidade dinâmica. Note que, para captarmos a menor faixa de diâmetros, deveríamos ter um fluido com a menor densidade possível.

Após a especificação do fluido a ser utilizado na coluna, os únicos parâmetros independentes serão a altura de decantação h e o tempo de medição t .

5. ANÁLISE DE COMPATIBILIDADE

Com relação à compatibilidade entre os sub-sistemas do dispositivo, podemos ressaltar :

- O volume de fluido utilizado não deve ultrapassar o volume especificado para o aparelho.

- A altura da coluna de decantação não deve ultrapassar a altura especificada do aparelho.

- O sistema de medição de massa decantada deve possuir precisão suficiente para gerar um número de pontos na curva adequado. Por exemplo, se utilizarmos uma massa de 0,5 g de particulado e uma balança com precisão de 0,1 g, obteremos apenas 5 pontos da curva. Se utilizarmos uma balança de grande precisão poderíamos utilizar menor massa de particulado mas isto prejudicaria o tempo de medição.

6. ANÁLISE DE ESTABILIDADE

Todas as instabilidades presentes no dispositivo agem no sentido de prejudicar a precisão da medida. Não há riscos de danificação do aparelho quando há grande variação dos seus parâmetros, salvo erros de manipulação.

As instabilidades presentes durante a utilização do aparelho estão relacionadas com :

- Flutuação de temperatura. Descartando a hipótese de elevação da temperatura até níveis críticos para o aparelho, sua flutuação afeta a interação entre as partículas e o meio fluido.
- Atritos. Qualquer introdução de perdas por atrito prejudicam ou inviabilizam a medida.

7. OTIMIZAÇÃO FORMAL

Antes de especificarmos os principais parâmetros físicos e funcionais do dispositivo, vamos analisar duas técnicas existentes para medição da distribuição granulométrica através de balança de decantação:

1º Solução homogênea

Nesta técnica, a coluna de decantação é totalmente preenchida por uma solução homogênea do particulado, isto é, toda a altura h desde a superfície da coluna até o fundo do prato deve estar preenchida pela solução.

Como foi descrito no modelo matemático, esta técnica exige que a curva seja corrigida pela equação (12) pois as partículas iniciam a decantação em alturas diferentes (observe a figura a baixo).

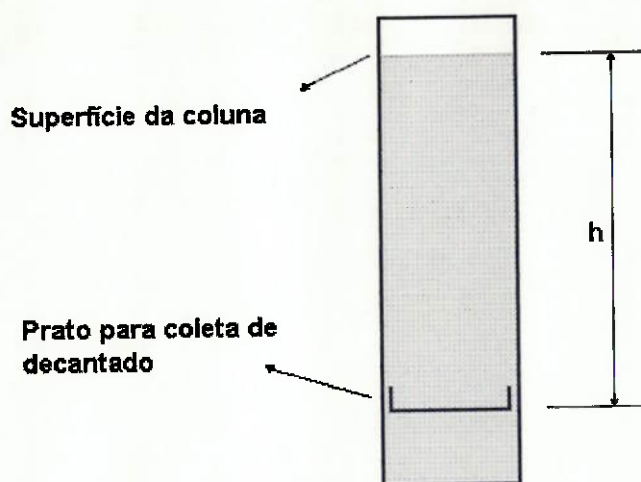


Figura 6

2º Duas Camadas (*Two Layer*)

Esta técnica considera que todo o particulado inicia a decantação na superfície da coluna de decantação. Isto pode ser feito adicionando o pó como uma fina camada no topo do fluido ou confinando uma solução deste pó em uma pequena região no topo da coluna de modo que se possa considerar que todas as partículas estão na mesma altura (veja a figura abaixo).

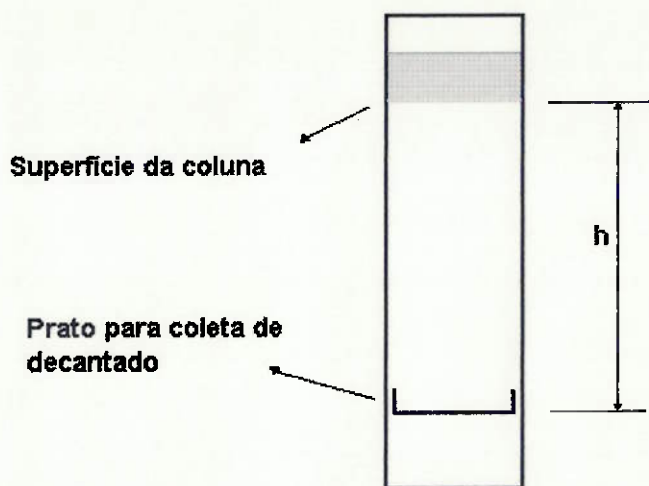


Figura 7

Esta solução é tecnologicamente difícil. No caso de adicionarmos o pó como uma fina camada, teremos os seguintes problemas:

- A massa de particulado deve ser muito pequena para evitar aglomeração. Isto implica em um tempo de medição elevado.
- Provavelmente as partículas já formarão aglomerados antes da introdução na coluna.
- A concentração de partículas será elevada intensificando a interação entre elas.

Se optarmos por introduzir uma solução do particulado no topo da coluna teremos os seguintes problemas:

- A solução deve permanecer homogênea quando do início da contagem do tempo o que implica em alguma forma de agitação. No entanto, quando iniciada a contagem, a solução deve estar em repouso.
- A solução deve ser contida no topo da coluna até o início da contagem do tempo. Isto implica em algum tipo de "portinhola" que possa ser aberta e fechada com o mínimo de perturbação.
- O fato da solução do particulado possuir densidade superior que o fluido da coluna implica no fenômeno conhecido como Correnteza (Streaming). O particulado decanta em massa deixando uma "cauda" atrás. Este fenômeno é muito difícil de ser eliminado e invalida completamente o modelo matemático.

Por esses motivos, recomenda-se a adoção da técnica da Solução Homogênea.

7.1 ESPECIFICAÇÃO DOS PARÂMETROS DE PROJETO

O granulômetro de decantação possui um conjunto de características interdependentes que afetam diretamente o projeto do aparelho. Estas características são:

- Fluido da coluna.
- Tempo de decantação.
- Volume da coluna.
- Quantidade de massa de particulado.
- Número de pontos desejáveis para a curva granulométrica.
- Técnica da Solução Homogênea (escolhida).

As demais características do projeto são especificadas como consequência das características citadas acima ou não possuem nenhum critério a priori. Como já discutiu-se, cada um desses parâmetros afeta os demais de modo que um conjunto ótimo deve ser encontrado.

Conforme discussão anterior, a água é o fluido que mais se adapta às especificações de projeto. Caso seja necessário, algum agente químico pode ser adicionado de modo a melhorar a dispersão do particulado na água.

O tempo de decantação já foi especificado devendo situar-se ao redor dos 30 minutos.

O volume da coluna está relacionado com a concentração desejada para a solução. Experiências de outros dispositivos indicam uma concentração ao redor de 0,2% (de massa). Além disso, a literatura recomenda uma massa de particulado ao redor de 0,5 g, para este tipo de dispositivo. Portanto, precisaremos de um volume de água aproximadamente igual a 300ml.

Escolhemos para a construção da coluna de decantação, um tubo de acrílico de diâmetro interno igual a 52mm. Desse modo, precisaremos de um comprimento aproximado de 14 cm. Este resultado está de acordo com a maioria dos dispositivos semelhantes existentes e é compatível com as especificações.

Dentre os dispositivos para a medição de massa disponíveis, escolhemos uma balança analítica de precisão igual a 0,01g como solução provisória. O escopo do projeto inclui o desenvolvimento de uma célula de carga com precisão semelhante. Como estipulamos uma massa de 0,5g de particulado, poderemos obter, no máximo, 50 pontos para a curva granulométrica.

Desse modo, reunimos o seguinte conjunto preliminar de parâmetros e características para o projeto do protótipo :

Dimensões da coluna de decantação :	Ø 52 mm x 140 mm.
Material da coluna de decantação :	Acrílico transparente.
Fluido utilizado na coluna :	Água.
Massa de particulado utilizado :	0,5 g.
Sistema de medição de massa :	Balança analítica.
Precisão do sistema de medição de massa :	0,01 g.
Tempo de medição ;	Ao redor de 30 min.
Método experimental do protótipo :	Solução Homogênea.

PARTE 3

PROJETO EXECUTIVO

ÍNDICE

1.	Projeto dos Conjuntos	21
1.1	Coluna de Decantação	21
1.2	Prato Coletor de Decantado	21
1.3	Sistema de Medição de Massa	22
1.4	Sistema de Homogenização da Solução	23
2.	Resultados	25
3.	Procedimento Experimental	26
4.	Análise do Protótipo	27
4.1	Aspectos a Serem Melhorados ou Desenvolvidos	27
4.2	Aspectos Positivos	28
	BIBLIOGRAFIA	29
	CONCLUSÃO	30
	ANEXOS	31

1. PROJETO DOS CONJUNTOS

Podemos dividir o protótipo em 4 partes ou sub-sistemas principais :

- Coluna de Decantação
- Prato coletor de decantado
- Sistema de medição de massa
- Sistema de homogenização da solução

1.1 COLUNA DE DECANTAÇÃO

Conforme o Projeto Básico, a coluna de decantação constitui-se de um tubo de acrílico transparente de diâmetro interno igual a 52 mm e comprimento igual a 14 cm. É imperativo que esta coluna não esteja solidária ao prato coletor de decantado. Para minimizar as transferências de calor através do tubo de acrílico, optamos por inserir a coluna no interior de um tubo maior preenchido com água (veja o esquema abaixo).

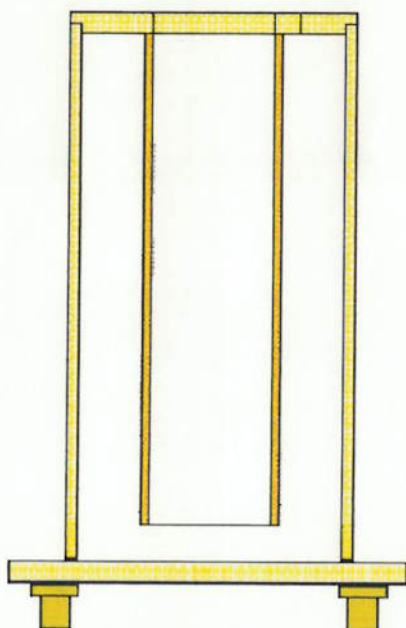


Figura 1

1.2 PRATO COLETOR DE DECANTADO

As dimensões do prato coletor de decantado foram especificadas arbitrariamente. Partimos, no entanto, de um tubo de acrílico de 72 mm de diâmetro interno e escolhemos uma altura de 25 mm. Foi adotado um tubo de diâmetro maior pois é interessante que a coluna fique inserida dentro do prato (ou copo). Dessa maneira evitamos o possível escape de particulado pelas bordas e aproximamos o fundo do

copo do final da coluna. Note que o copo também fica inserido dentro do tubo externo. É importante frisar que o copo deve ficar completamente livre abaixo da coluna e isento de atritos (observe a figura abaixo).

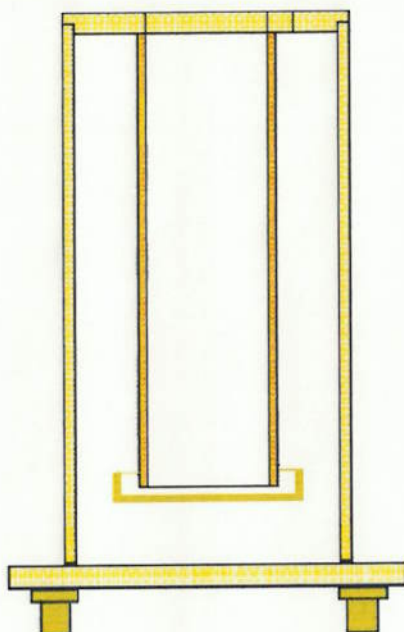


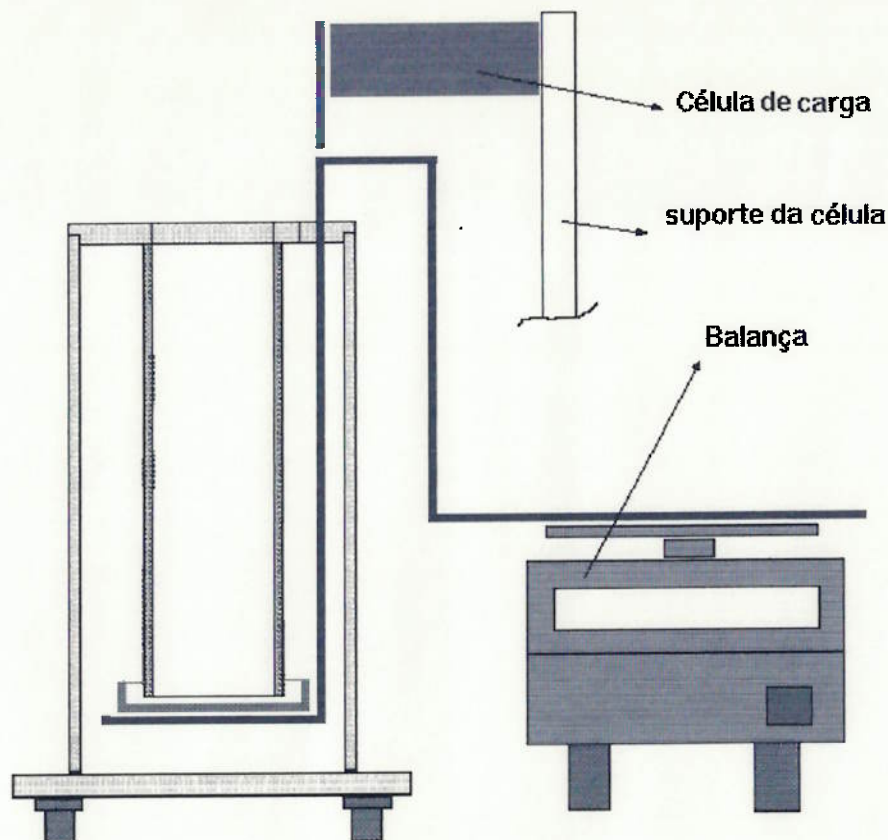
Figura 2

1.3 SISTEMA DE MEDIÇÃO DE MASSA

Como adotamos como solução provisória uma balança analítica com precisão de 0,01 g, precisaremos transmitir a força exercida pela massa decantada sobre o copo até o prato da balança. Para tanto, utilizaremos um sistema de barras de aço com regulagem de nível (veja figura abaixo) transmitindo a força pela lateral externa da coluna. A opção seria transmitir a força pelo centro da coluna mas a influência sobre o processo de decantação poderia ser indesejável.

Contudo, este sistema possui rigidez relativamente baixa de modo que o peso do copo flexiona a barra podendo encostá-la na parede do tubo externo. O atrito decorrente inutilizaria a medida.

A solução ideal seria transmitir a força diretamente para uma célula de carga, conforme a figura abaixo.



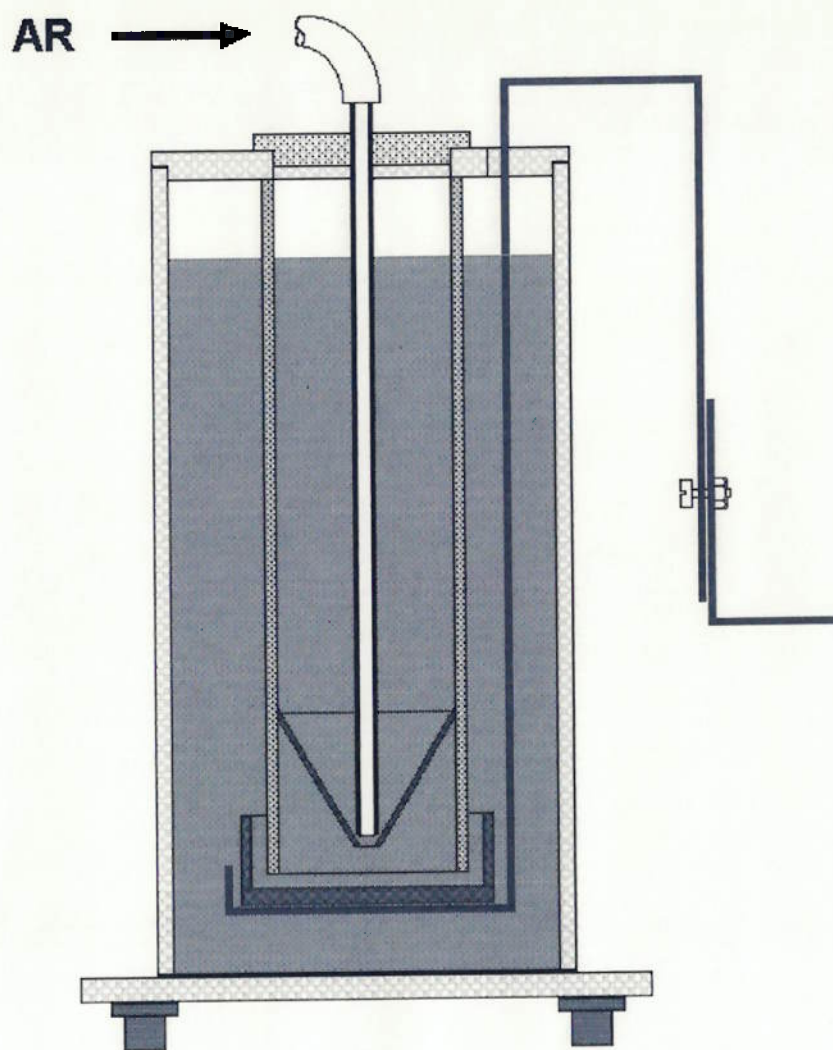
1.4 SISTEMA DE HOMOGENIZAÇÃO DA SOLUÇÃO

Como estamos utilizando a técnica da solução homogênea, precisamos de um sistema que faça duas coisas :

- Homogenize a solução de particulado até o início da contagem do tempo.
- Impeça que a massa de decantado repouse sobre o prato antes do início da contagem do tempo.

A solução adotada esta representada na figura abaixo. Ela consiste de um funil que é adicionado no interior da coluna de modo que a saída do funil esteja posicionada um pouco antes do final do tubo. Além disso, coloca-se uma vareta oca no interior da coluna posicionando sua extremidade no final do funil. Através desta vareta, bombeia-se ar. Este ar borbulha do interior do funil para cima e do interior do funil para baixo. As bolhas que sobem ajudam a homogenizar a solução. O ar que desce é acumulado na parte que ainda resta do tubo isolando a solução da água limpa. Quando do início da contagem, remove-se a vareta fazendo com que os dois "recipientes" se comuniquem e permitindo que a decantação se inicie.

O protótipo completo está esquematizado abaixo :



2. RESULTADOS

Com o protótipo construído da maneira descrita acima, foram executadas duas medidas para uma amostra de Carbonato de Cálcio.

Dados :	Altura de decantação :	$h = 193 \text{ mm}$
	Viscosidade Dinâmica :	$\eta = 0,00114 \text{ Nsm}^{-2}$
	Aceleração da gravidade :	$g = 9,81 \text{ ms}^{-2}$
	Densidade da água :	$\rho_f = 1000 \text{ kgm}^{-3}$
	Densidade da partícula :	$\rho_s = 2650 \text{ kgm}^{-3}$

$m = 0,66 \text{ g}$			$m = 0,65 \text{ g}$		
md (g)/% acum.	t (min)	D (μm)	md (g)/% acum.	t (min)	D (μm)
0 / 0	1	63,9	0 / 0	1	63,9
0 / 0	2	45,2	0 / 0	2	45,2
0,01 / 1,52	3	36,9	0,02 / 3,1	3	36,9
0,05 / 7,58	4	31,9	0,06 / 9,2	4	31,9
0,10 / 15,2	5	28,6	0,11 / 16,9	5	28,6
0,14 / 21,2	6	26,1	0,15 / 23,1	6	26,1
0,17 / 25,8	7	24,1	0,18 / 27,7	7	24,1
0,19 / 28,8	8	22,6	0,20 / 30,8	8	22,6
0,20 / 30,3	9	21,3	0,22 / 33,8	9	21,3
0,22 / 33,3	10	20,2	0,23 / 35,4	10	20,2
0,27 / 40,9	15	16,5	0,27 / 41,5	15	16,5
0,29 / 43,9	20	14,3	0,29 / 44,6	20	14,3
0,30 / 45,5	25	12,8	0,29 / 44,6	25	12,8
0,32 / 48,5	30	11,7	0,30 / 46,2	30	11,7
0,33 / 49,5	35	11,2	0,31 / 47,7	35	11,2

Com os resultados montamos o gráfico anexado ao final do trabalho. Observe a existência de uma curva em azul. Esta curva foi obtida através da medida, da mesma amostra, com um aparelho de nome Shimadzu existente no Laboratório de Metalurgia do Pó do Instituto de Pesquisas Tecnológicas (IPT) da Universidade de São Paulo. O Shimadzu opera com feixe de luz e coluna de decantação em rotação.

3. PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

As medidas realizadas com o aparelho seguiram as seguintes etapas :

- 1- Separação de uma amostra de, aproximadamente, 0,5g, de Carbonato de Cálcio Micronizado.
- 2- Lavagem de todos os componentes (coluna de decantação, tubo externo e copo).
- 3- Montagem do sistema de medição de massa sobre a balança de laboratório e colocação do copo dentro do tubo externo. Deixar o copo livre de contato com as paredes do tubo externo.
- 4- Colocar a tampa sobre o tubo externo.
- 5- Preencher o dispositivo com 1200 ml de água comum.
- 6- Verificar o posicionamento do copo.
- 7- Zerar a tara da balança.
- 8- Ligar a bomba de ar e colocar a vareta no interior da coluna. Aguarde até que o ar interrompa o contato entre a água do fundo da coluna e a água da coluna de decantação (regule a vazão de ar se necessário).
- 9- Coloque a amostra de particulado no interior da coluna de decantação, através da abertura superior.
- 10- Aguarde aproximadamente 2 minutos para que a solução se homogenize.
- 11- Remova rapidamente a vareta do interior da coluna e acione o cronômetro.
- 12- A partir de agora, apenas acompanhe a medida da balança de acordo com a escala de tempo adotada.
- 13- Ao final da medida, desmonte o dispositivo e lave os componentes com água.

4. ANÁLISE DO PROTÓTIPO

4.1 ASPECTOS A SEREM MELHORADOS OU DESENVOLVIDOS

- 1- As folgas construtivas do protótipo devem ser eliminadas para evitar introdução de erros durante a medida. Este problema foi detectado no ajuste da tampa do tubo externo. Como esta tampa está solidária à coluna de decantação, qualquer perturbação afeta diretamente o processo de decantação.
- 2- O estrangulamento da coluna deve ser substituído por peça usinada em acrílico para evitar flutuação da coluna. A quantidade de ar que se acumula ao redor do funil é suficiente para elevar toda a coluna de decantação. Se o funil fosse maciço este problema não ocorreria.
- 3- A coluna deve ser revestida internamente com substância lubrificante para evitar aglomeração de particulado nas paredes. As partículas menores ficam agregadas as paredes da coluna de decantação. Existem substâncias químicas que minimizam este problema.
- 4- O sistema de medição de massa deve ser substituído por célula de carga para evitar problemas com rigidez do sistema de transmissão de força. Como explicado anteriormente, a solução ideal seria conectar uma célula de carga à base do aparelho evitando problemas de rigidez.
- 5- Diâmetro da coluna e do tubo externo podem ser aumentados para diminuir a concentração da solução ou permitir aumento da massa de particulado. Se a massa de particulado pudesse ser aumentada, o sistema de medição de decantado poderia ser menos preciso.
- 6- A leitura da massa pode ser automatizada e a curva traçada por computador. Isto permitiria um maior tempo de medição.
- 7- Um sistema de lavagem do tubo externo deve ser desenvolvido para evitar desmontagem do sistema de medição de decantado.
- 8- Deve ser verificada a possibilidade do uso de uma bomba de ar à pilha para evitar dependência de rede elétrica.
- 9- Deve ser desenvolvido um software de correção da curva granulométrica. Conforme pudemos observar, a curva granulométrica obtida possui imprecisões que variam dependendo da faixa de diâmetros considerada.
- 10- Deve ser estudado o caso crítico de amostras com média ao redor de 1 μm . Sabe-se que os fenômenos que interferem no processo de decantação são extremamente prejudiciais quando executamos medidas em amostras com diâmetro médio ao redor de 1 μm . Não foram feitas leituras com este tipo de amostra por falta de curva comparativa.

- 11- Deve ser estudada a influência de medições em ambiente de temperatura controlada.
- 12- Deve ser estudada a influência do posicionamento do prato em relação ao final do estrangulamento. O espaço que separa a extremidade do funil do fundo do prato não possui uma solução homogênea do particulado, conforme admitido nos cálculos. A influência disto não estuda a fundo.
- 13- Deve ser estudada uma maneira de se minimizar a movimentação da solução logo antes da contagem do tempo. Ao retirarmos a vareta de borbulhamento, a solução permanece em movimentação por algum tempo. Essa movimentação afeta o processo de decantação nos primeiros minutos.
- 14- Deve ser estudada uma solução que permita a leitura de toda a curva em um tempo razoável. Como pudemos perceber, em 30 minutos de leitura só foi possível obter 50% de massa decantada.

4.2 ASPECTOS POSITIVOS

- 1- O protótipo desenvolvido não possui problemas de perda de decantado. Muitos aparelho tem o copo de coleta de decantado inserido dentro da coluna
- 2- O sistema de liberação do particulado (borbulhamento) oferece uma solução simples para o problema de homogenização e contenção da amostra antes do início da contagem do tempo.
- 3- A coluna interna também imersa em água ajuda a minimizar os problemas com correntes de convecção.
- 4- O sistema de medição de decantado mostrou-se satisfatório. Não houve problemas com atritos.
- 5- A curva granulométrica forneceu resultados satisfatórios para a média da distribuição.
- 6- Não há, a princípio, muita dispersão dos dados da curva. Mais análises devem ser feitas.
- 7- O aparelho possui custo muito inferior ao especificado.
- 8- A massa de particulado utilizada é muito inferior à especificada.

BIBLIOGRAFIA

- [1] ALLEN, T, *Particle Size Measurement*, 3rd Edition, Powder Technology Series, Chapman and Hall, London, 1974.

CONCLUSÃO

Estudo de Viabilidade :

O Estudo de Viabilidade foi realizado considerando-se exclusivamente as análises presentes na bibliografia. Foram consideradas várias soluções existentes na realidade bem como as conclusões feitas pelo autor do livro a respeito de cada uma delas. Apesar de não podermos constatar, na prática, as características de cada solução, acreditamos que a análise comparativa foi mantido em um nível satisfatório para a nossa necessidade.

Os parâmetros e características impostos ao nosso projeto resultaram de uma condensação das melhores características de algumas soluções práticas que se utilizam do método escolhido. Ao final do projeto concluímos que alguns desses parâmetros poderiam ser modificados para melhor se adequarem ao projeto. No entanto, essas mudanças não modificaram a conclusão inicial de que o método escolhido e o projeto executado constituem-se a melhor forma de solucionar o problema proposto, dentro das restrições impostas e das limitações inerentes ao problema.

Projeto Básico :

O Projeto Básico do dispositivo foi o resultado de uma seleção de características que julgamos, a princípio, adequadas ao problema. Como não dispúnhamos de nenhuma comparação adequada, criamos um projeto inteiramente original baseando-se em descrições e análises de pesquisadores presentes na bibliografia. Como resultado, obtivemos um projeto muito "cru" mas que possui um grande potencial de desenvolvimento. Muitas características devem ser modificadas e outras devem ser incluídos em uma nova etapa de concepção do dispositivo. No entanto, os resultados obtidos com este primeiro protótipo ajudam muito no desenvolvimento de um modelo melhor.

Projeto Executivo :

O Projeto Executivo desenvolveu-se sobre os parâmetros determinados no Projeto Básico. Contudo, as dimensões físicas do protótipo bem como suas especificações foram criadas ao longo da construção do mesmo. O resultado, como dissemos, ainda está aquém da necessidade real mas contribuiu muito para a compreensão do problema e como forma de alavancar futuros desenvolvimentos.

Parte do escopo do projeto inclui a construção de um software com a função de reduzir as distorções do resultado das medidas com relação à curva obtida com outros aparelhos. Este software, baseado em um algoritmo de Redes Neurais, não foi construído por falta de tempo mas, acreditamos, possibilitaria um grande salto no desempenho do dispositivo. Incentivamos qualquer pessoa que se interesse pelo projeto que procure desenvolver algum modelo viável para este software.

PROTÓTIPO

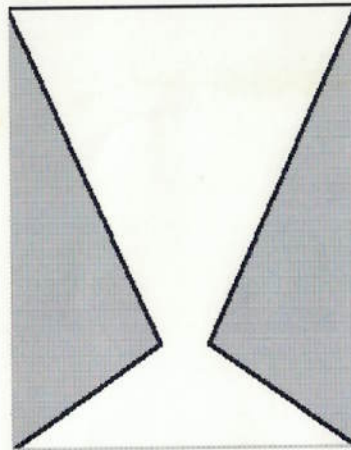
A seguir estão as fotografias feitas com o protótipo construído. Elas tem por objetivo mostrar a aparência de cada componente bem como o processo de decantação.

Note que o sistema de medição de decantado não está incluído nas fotos de modo que o prato de decantado está repousado sobre o fundo da coluna quando, na verdade, deveria estar suspenso com seu fundo bem próximo do final da coluna interna (veja fotos adiante).

Outro detalhe que deve ser levantado é a utilização do funil provisório nas fotos. A peça deveria ser construída de acrílico e possuir um formato semelhante ao esquematizado abaixo. Dessa maneira, o problema de acúmulo de ar ao redor do funil seria eliminado.



Funil de Plástico



Funil de Acrílico

TRANSPARÊNCIAS

A seguir estão as transparências utilizadas na apresentação do trabalho. Elas contém um resumo dos principais aspectos do projeto.

Granulômetro de Decantação para Carbonato de Cálcio Micronizado

GRANULÔMETRO



Aparelho utilizado para a determinação do tamanho de partículas sólidas.

DECANTAÇÃO



Princípio fundamental de funcionamento dos granulômetros.

CARBONATO DE CÁLCIO MICRONIZADO

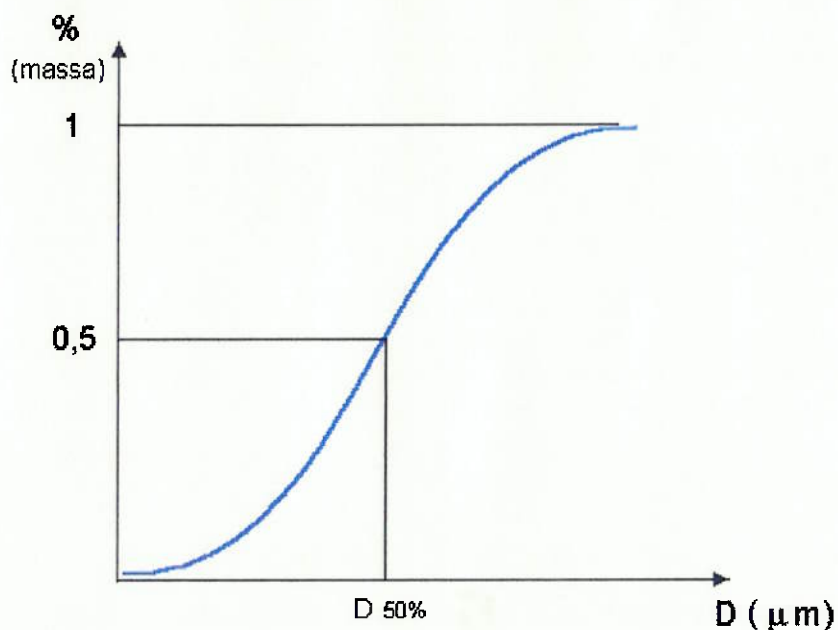


Pó alvo e muito fino (semelhante ao talco).

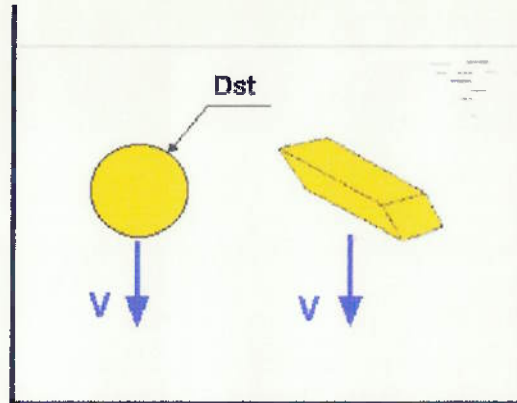
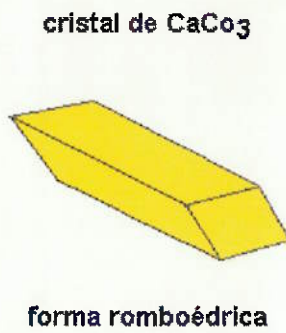
OBJETIVO : Caracterização de uma amostra de CaCO_3



Distribuição Granulométrica



Tamanho do cristal = Diâmetro de Stokes



CaCO_3

Papel

Tintas

Cal

PVC

Aumentar a dureza e rigidez do composto

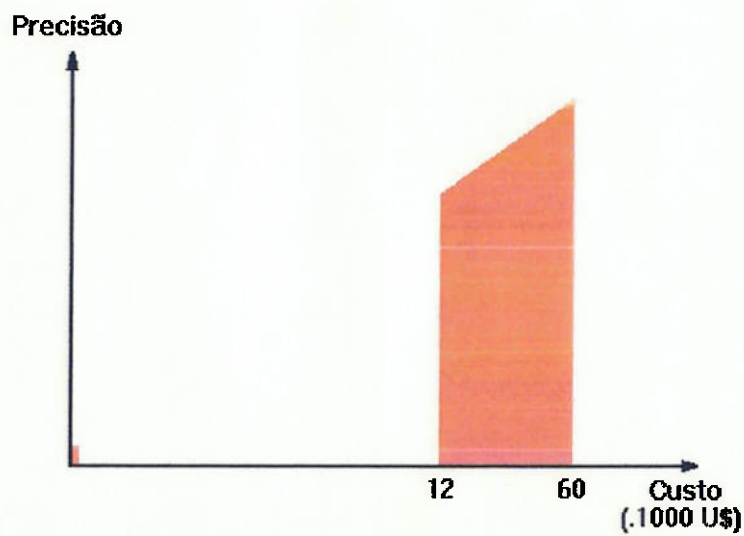
Reduzir o seu custo

Melhorar a resistência ao calor

Modificar a aparência

Regular características elétricas

PRECISÃO X CUSTO



No Brasil, a produção de Carbonato de Cálcio micronizado é feita por poucas empresas. A maioria delas não possui nenhum método de controle de qualidade.

NECESSIDADE :

“ Construir um dispositivo de medição da distribuição granulométrica do Carbonato de Cálcio micronizado para atender as especificações do mercado produtor de compostos de PVC.”

ESPECIFICAÇÕES TÉCNICAS

Custo	no máximo R\$ 1500,00 (apenas custo de produção do aparelho completo)
Tamanho e Manipulação	Volume : 30 cm de largura X 30 cm de comprimento X 45 cm de altura. Peso : menor que 4kg
Substâncias Descartáveis	Água e possivelmente algum aditivo não tóxico.
Versatilidade	Medida restrita a particulados de Carbonato de Cálcio
Precisão	10% para a distribuição granulométrica contando erros de aparelhagem, cálculos e imprecisões de medida.
Operação	Ação direta do operador apenas no início. O procedimento deve ser padronizado.
Tempo de Medição	No máximo 40 minutos contando manipulação de dados
Entradas e Saídas	Entrada : Amostra de particulado com massa não superior a 50 gramas ou uma solução desta amostra. Saída : conjunto de dados que permita a obtenção da curva granulométrica com a precisão desejada.
Resíduos	Não tóxicos e biodegradáveis.
Durabilidade	2 anos em média sem substituição de peças.

SÍNTESE DE SOLUÇÕES

Medidor de Concentração por Feixe de Luz

Hidrômetros Miniatura - Mergulhador (*Diver*)

Balança de Decantação

Túnel de Decantação Horizontal

Microscopia

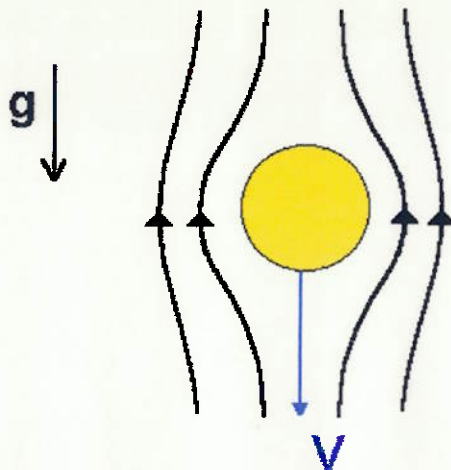
Este método de determinação da distribuição granulométrica de um particulado consiste basicamente da observação, através de um microscópio ótico, de um slide contendo uma amostra representativa do particulado.

Medidor de Concentração por raio de luz :	8,3
Balança de Decantação :	8,1
Hidrômetro miniatura :	7,9
Microscopia :	7,1
Túnel Horizontal :	6,3

MELHOR SOLUÇÃO

Balança de Decantação

MODELO FÍSICO



Simplificações do Modelo :

- As partículas de CaCO_3 são admitidas esféricas.
- As partículas devem estar dispersas no fluido de modo que uma não interfira na outra.
- O fluido não deve sofrer variação de temperatura.
- O fluido deve ter extensão infinita.

MODELO MATEMÁTICO

Equação de Stokes :

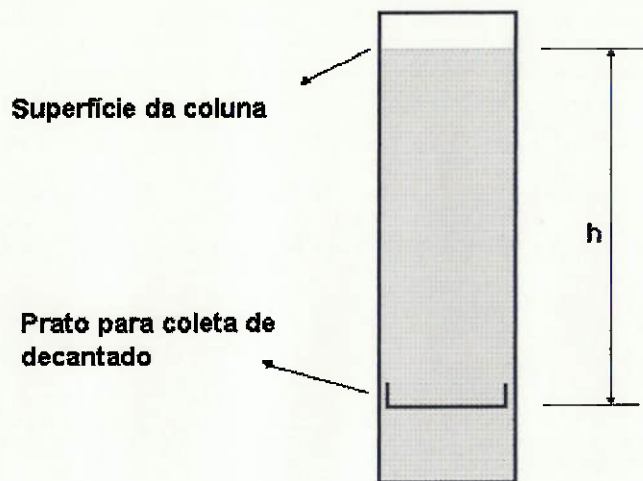
$$u_{st} = \frac{(\rho_s - \rho_f)gD^2}{18\eta}$$

As hipóteses assumidas na derivação da equação de Stokes são:

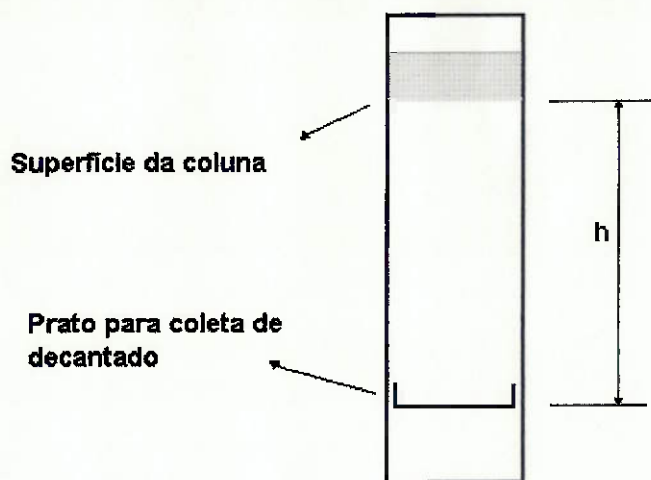
- 1- A partícula deve ser esférica.
- 3- A velocidade terminal deve ser atingida.
- 4- A velocidade de decantação deve ser baixa de modo que os efeitos inerciais sejam insignificantes.
- 5- O fluido deve ser homogêneo em comparação com o tamanho da partícula.
- 3- O Número de Reynolds deve ser da ordem de 0,2

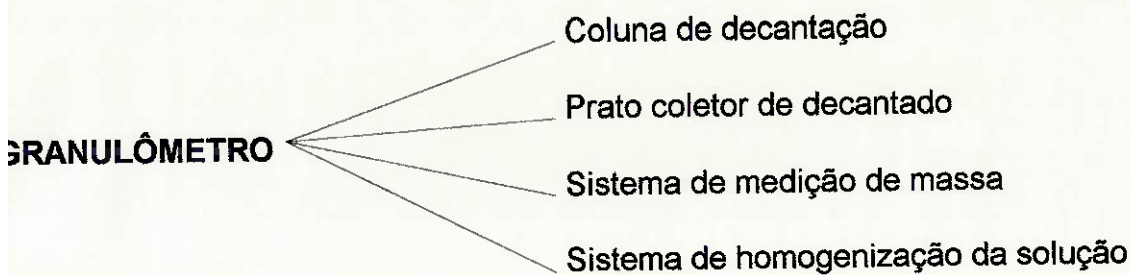
TÉCNICAS EXPERIMENTAIS

- 1º Solução Homogênea: Coluna inicialmente preenchida pela solução.
Problema : Correção do diâmetro.



- 2º Duas Camadas: Solução inicialmente no topo da coluna.
Problema : correnteza (*Streaming*)





COLUNA DE DECANTAÇÃO

Diâmetro do tubo escolhido : 52 mm
Concentração desejada (massa de granulado / massa total) : 0,2 %
Massa de granulado desejado : 0,5 g
Fluido escolhido : Água

→ Volume de água : 300 ml

→ Altura da coluna : 14 cm

PRATO COLETOR DE DECANTADO

- Diâmetro do tubo escolhido : 73 mm
- Altura do prato : 25 mm

SISTEMA DE MEDIÇÃO DE MASSA (SOLUÇÃO PROVISÓRIA)

- Instrumento disponível : Balança analítica com precisão de 0,01 g.
- Sistema de transmissão de força não deve interferir na decantação.
- Não devem existir atritos.

SISTEMA DE HOMOGENIZAÇÃO DA SOLUÇÃO

- A solução deve estar completamente homogênea quando do início da contagem do tempo.

RESULTADOS

Dados : Altura de decantação : $h = 193 \text{ mm}$
 Viscosidade Dinâmica : $\eta = 0,00114 \text{ Nsm}^{-2}$
 Aceleração da gravidade : $g = 9,81 \text{ ms}^{-2}$
 Densidade da água : $\rho_f = 1000 \text{ kgm}^{-3}$
 Densidade da partícula : $\rho_s = 2650 \text{ kgm}^{-3}$

m = 0,66 g			m = 0,65 g		
md (g)/% acum.	t (min)	D (μm)	md (g)/% acum.	t (min)	D (μm)
0 / 0	1	63,9	0 / 0	1	63,9
0 / 0	2	45,2	0 / 0	2	45,2
0,01 / 1,52	3	36,9	0,02 / 3,1	3	36,9
0,05 / 7,58	4	31,9	0,06 / 9,2	4	31,9
0,10 / 15,2	5	28,6	0,11 / 16,9	5	28,6
0,14 / 21,2	6	26,1	0,15 / 23,1	6	26,1
0,17 / 25,8	7	24,1	0,18 / 27,7	7	24,1
0,19 / 28,8	8	22,6	0,20 / 30,8	8	22,6
0,20 / 30,3	9	21,3	0,22 / 33,8	9	21,3
0,22 / 33,3	10	20,2	0,23 / 35,4	10	20,2
0,27 / 40,9	15	16,5	0,27 / 41,5	15	16,5
0,29 / 43,9	20	14,3	0,29 / 44,6	20	14,3
0,30 / 45,5	25	12,8	0,29 / 44,6	25	12,8
0,32 / 48,5	30	11,7	0,30 / 46,2	30	11,7
0,33 / 49,5	35	11,2	0,31 / 47,7	35	11,2

ANÁLISE DO PROTÓTIPO

ASPECTOS A SEREM MELHORADOS OU DESENVOLVIDOS

- 1- Folgas construtivas devem ser eliminadas para evitar introdução de erros durante a medida.
- 2- O estrangulamento da coluna deve ser substituído por peça usinada em acrílico para evitar flutuação da coluna.
- 3- A coluna deve ser revestida internamente com substância lubrificante para evitar aglomeração de particulado nas paredes.
- 4- O sistema de medição de massa deve ser substituído por célula de carga para evitar problemas com rigidez do sistema de transmissão de força.
- 5- Diâmetro da coluna e do tubo externo podem ser aumentados para diminuir a concentração da solução ou permitir aumento da massa de particulado.
- 3- A leitura da massa pode ser automatizada e a curva traçada por computador.
- 7- Um sistema de lavagem do tubo externo deve ser desenvolvido para evitar desmontagem do sistema de medição de decantado.
- 8- Deve ser verificada a possibilidade do uso de uma bomba de ar à pilha.
- 9- Deve ser desenvolvido um software de correção da curva granulométrica.
- 10- Deve ser estudado o caso crítico de amostras com média ao redor de 1 μm .
- 11- Deve ser estudada a influência de medições em ambiente de temperatura controlada.
- 12- Deve ser estudada a influência do posicionamento do prato em relação ao final do estrangulamento.
- 13- Deve ser estudada uma maneira de se minimizar a movimentação da solução logo antes da contagem do tempo.
- 14- Deve ser estudada uma solução que permita a leitura de toda a curva em um tempo razoável.

ASPECTOS POSITIVOS

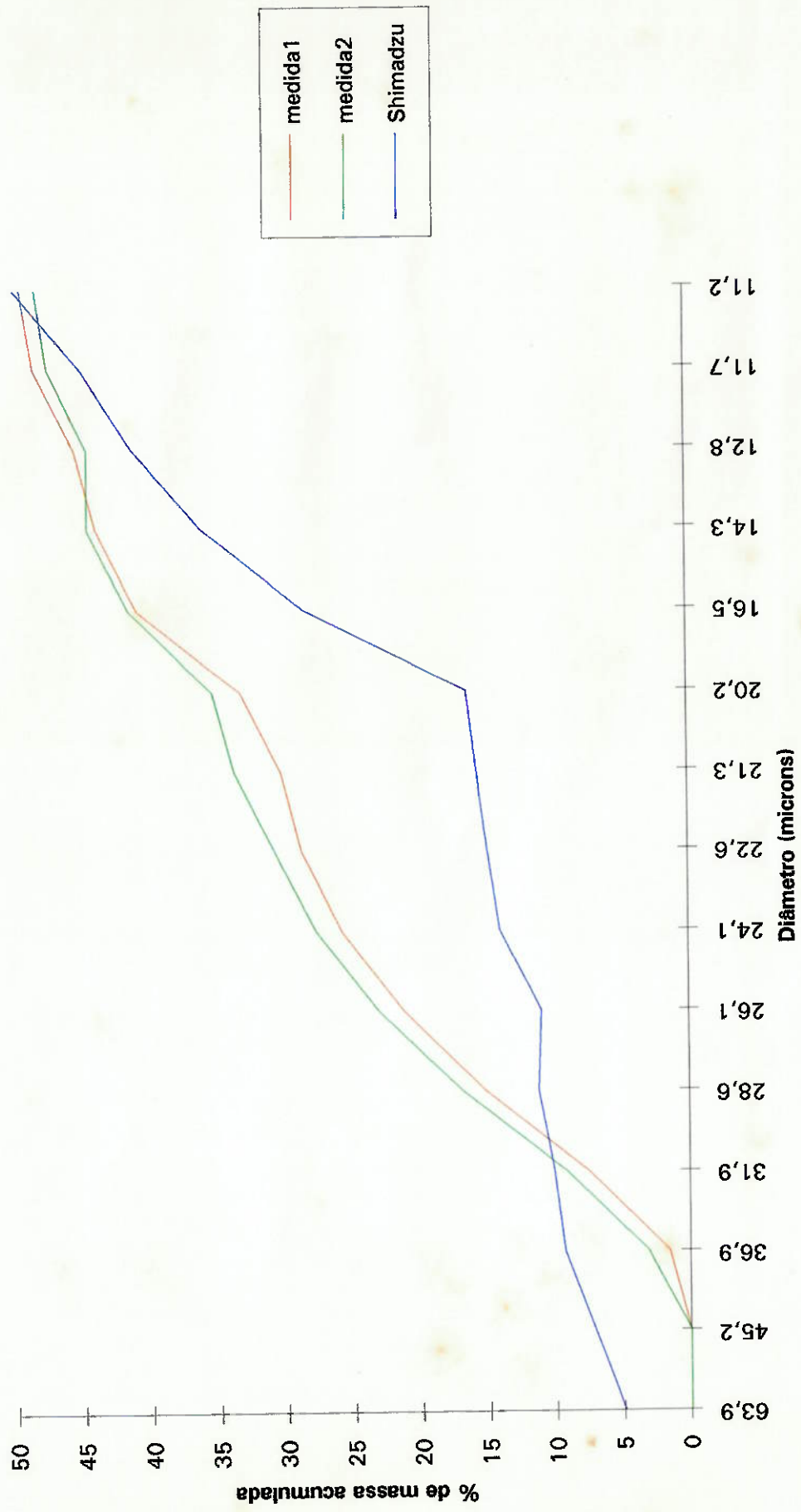
- 1- O protótipo desenvolvido não possui problemas de perda de decantado.
- 2- O sistema de liberação do particulado (borbulhamento) oferece uma solução simples para o problema de homogeneização e contenção da amostra antes do início da contagem do tempo.
- 3- A coluna interna também imersa em água ajuda a minimizar os problemas com correntes de convecção.
- 4- O sistema de medição de decantado mostrou-se satisfatório. Não houve problemas com atritos.
- 5- A curva granulométrica forneceu resultados satisfatórios para a média da distribuição.
- 6- Não há, a princípio, muita dispersão dos dados da curva. Mais análises devem ser feitas.
- 7- O aparelho possui custo muito inferior ao especificado.
- 8- A massa de particulado utilizada é muito inferior à especificada.

DISTRIBUIÇÃO GRANULOMÉTRICA

A seguir está o gráfico da Distribuição Granulométrica de uma amostra de Carbonato de Cálcio Micronizado levantado com o protótipo construído. Foram feitas duas medidas com o aparelho (linhas verde e vermelho) e comparadas com uma curva de um aparelho de nome Shimadzu que funciona à base de feixe de luz e com a coluna em rotação. Este aparelho está no laboratório de Metalurgia do Pó no Instituto de Pesquisas Tecnológicas (IPT).

Note que a curva cobre apenas 50% da amostra num tempo total de amostragem de 30 minutos.

Distribuição Granulométrica para uma amostra de Carbonato de Cálcio micronizado







Nesta seqüência, o fluxo de ar foi interrompido e a decantação teve início. Observe a linha água-ar: quando o ar foi cortado, o ar que separava a solução da água limpa foi para dentro da coluna e os dois líquidos se comunicaram.

Nesta experiência foi utilizada uma massa de Carbonato superior à recomendada. Note o efeito do excesso sobre a decantação. Este fenômeno prejudicial chama-se *Streaming* e é extremamente difícil de ser neutralizado.

A foto seguinte mostra o sistema com 1 minuto de decantação.



Na foto acima, podemos identificar todos os componentes do protótipo:

Na extrema esquerda observa-se o tubo de acrílico que conduz o ar para a extremidade do funil. Note a peça intermediária de acrílico que fixa o tubo na tampa superior da coluna. Note também a válvula de ar e a mangueira de plástico. Esta mangueira é conectada à uma bomba de ar de baixa potência.

Seguindo para a direita observa-se a coluna externa com fundo quadrado e o prato de coleta de decantado (abaixo).

Em seguida está a coluna interna de decantação. Note que a tampa superior está fixada à coluna juntamente com o funil de plástico. Dessa maneira, a coluna fica solidária ao tubo externo e sua extremidade fica suspensa permitindo o posicionamento do prato de decantado logo abaixo (que possui diâmetro maior).

O prato é suspenso através da parte inferior de uma armação metálica em forma de S. Esta armação é, por sua vez, fixada à outra armação (extrema direita) que ficará sobre o prato da balança analítica. Lembre-se que este arranjo não é definitivo.

Note a chapa de metal fixada à armação : ela tem a função de equilibrar o centro de massa do conjunto prato-armação evitando o tombamento. Este fator é importante pois qualquer inclinação da armação pode fazer com que o prato encoste na parede do tubo externo inutilizando a medida.

A fixação entre as duas armações metálicas é feita através de um parafuso que permite a regulação da altura do prato de coleta de decantado.

Finalmente, observe o pacote contendo a amostra utilizada de Carbonato de Cálcio.



Esta foto mostra o conjunto montado (incompleto) :

Observe que as duas armações de metal não estão fixadas pois não foi incluída a balança na foto. Por esse motivo, o prato está no fundo da coluna.

A armação que sustenta o prato atravessa a tampa superior por uma ranhura usinada na mesma. Observe que o braço vertical da armação fica bem próximo à parede do tubo externo. É muito importante que ele não encoste na parede pois o atrito inutilizaria a medida.



Esta foto mostra a coluna interna cheia de ar e a externa cheia de água. Observe a linha que divide a água do ar localizada bem na extremidade do funil de plástico. Com o fornecimento de ar, a linha divisória desceria abaixo da extremidade do funil dividindo fisicamente a coluna interna da coluna externa. É importante que o fluxo de ar seja bem dosado para que o ar não saia por baixo da coluna interna.

Uma dificuldade que surge com essa montagem é que o ar que se acumula ao redor do funil de plástico exerce um empuxo muito grande sobre a coluna interna fazendo com que esta seja suspensa. A configuração definitiva consiste de um funil maciço de acrílico. Assim, não haveria acúmulo de ar.

Note que as bolhas de ar que saem da extremidade do tubo delgado vão para a parte superior do funil e não para a inferior. Isto é importante pois essas bolhas são as responsáveis pela homogeneização da solução. Ainda, se elas escapassem para baixo, carregariam a solução de Carbonato de Cálcio junto.



Esta foto mostra a coluna interne preenchida com a solução de Carbonato de Cálcio. Observe a linha que divide o ar da água: ela está bem abaixo da extremidade do funil de plástico. Dessa maneira, a solução fica isolada da água limpa. Enquanto isso, as bolhas de ar homogeneizam a solução na coluna interna.