

### 3 Características dos Solos Utilizados

#### 3.1. Escolha do Material Utilizado

Para avaliar neste trabalho a influência da mineralogia, do índice de vazios e do teor de umidade em propriedades térmicas de solos, trabalhou-se com misturas de materiais argilosos e arenosos em diferentes proporções, a fim de se obter um controle sobre sua composição mineralógica e granulométrica, e assim poder analisar a influência destas sobre os parâmetros térmicos de interesse.

As misturas foram compostas a partir de argilas Caulim e Bentonita e Material Granular (Areia Quartzosa), misturados em diferentes proporções, formando os 09 solos listados na Tabela 3.

Tabela 3 – Misturas de Caulim, Bentonita e Areia Quartzosa utilizadas.

| Solos                       | Proporções (%) |           |       | Nomenclatura |
|-----------------------------|----------------|-----------|-------|--------------|
|                             | Caulim         | Bentonita | Areia |              |
| <b>Caulim</b>               | 100            | -         | -     | C100         |
| <b>Caulim</b>               | 80             | 20        | -     | C80          |
| <b>+</b>                    | 60             | 40        | -     | C60          |
| <b>Bentonita</b>            | 40             | 60        | -     | C40          |
| <b>Areia mal Graduada</b>   | -              | -         | 100   | AMG          |
| <b>Areia Uniforme</b>       | -              | -         | 100   | AU           |
| <b>(Caulim + Bentonita)</b> | 32             | 48        | 20    | CB80         |
| <b>+</b>                    | 24             | 36        | 40    | CB60         |
| <b>(Areia mal Graduada)</b> | 16             | 24        | 60    | CB40         |

É importante salientar que a nomenclatura adotada para os solos, exceto para as areias, está relacionada à porcentagem de Caulim presente nos mesmos para os solos C100, C80, C60 e C40, ou seja, o solo C100, por exemplo, contém 100% de Caulim, o solo C80 contém 80% e assim sucessivamente. Já para os solos CB80, CB60 e CB40, a nomenclatura adotada está relacionada com a porcentagem de caulim+bentonita nas misturas destas com a areia mal

graduada, ou seja, o solo CB80, contém 80% da mistura de caulim+bentonita e 20% de areia mal graduada e assim sucessivamente. A mistura de caulim+bentonita utilizada na composição destes solos foi de 40% e 60% respectivamente.

O Caulim utilizado neste trabalho foi adquirido através da Mineradora de Caulim Monte Pascoal Ltda e é proveniente de uma jazida situada no sul do Estado da Bahia, no município de Prado (Figura 8), onde ocorrem extensos depósitos de caulim.

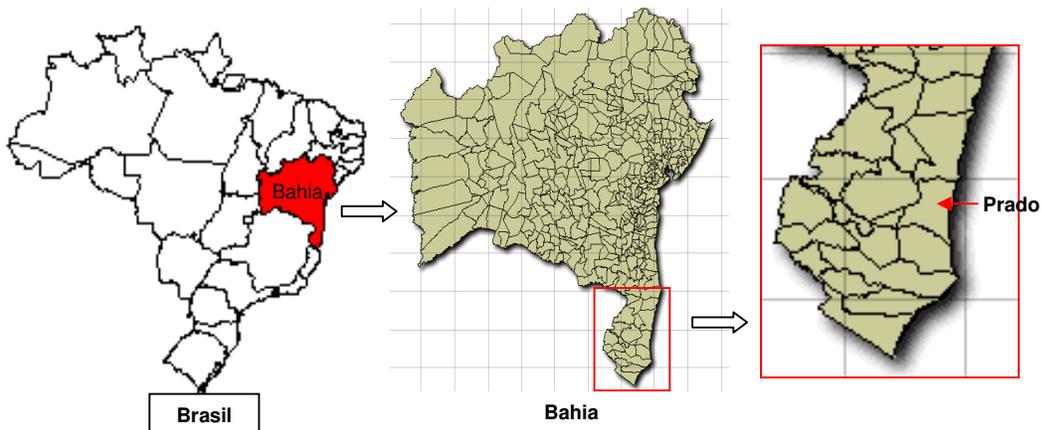


Figura 8 – Localização da cidade de Prado no Sul do Estado da Bahia (FONTE: IBGE).

De acordo com Bertolino (2000), a principal jazida da Monte Pascoal, a Mina Caliman, é constituída por um espesso depósito de caulim, uma seqüência de aproximadamente 30m de espessura, contendo aproximadamente 100 milhões de toneladas de minério e encontra-se em um estágio avançado de exploração. A mina Walmor localiza-se a cerca de 300m da Caliman e na época (2000) encontrava-se em fase inicial de exploração.

Segundo Villas Boas et al. (1996), os depósitos de caulim do sul da Bahia pertencem a uma grande unidade geológica denominada Grupo Barreiras, formada por extensos depósitos de sedimentos terrígenos dispersos na forma de tabuleiros em patamares ligeiramente inclinados para o litoral. Os sedimentos são constituídos por camadas de espessura variada de sedimentos arenosos de coloração bege ou levemente esbranquiçado, ricos em caulinita e quartzo.

Normalmente o caulim ocorre associado a diversas impurezas, sendo necessário processos de beneficiamento para adequá-lo ao uso industrial. O Caulim utilizado neste trabalho foi beneficiado (peneirado) e suas características mineralógicas, químicas e físicas serão apresentadas no item 3.3. A Figura 9 apresenta uma fotografia da Mina de Caliman da Monte Pascoal.



Figura 9 – Mina de Caliman da Mineradora Monte Pascoal, Prado-BA (Bertolino, 2000).

A Bentonita utilizada neste trabalho é explorada pela mineradora Castiglioni, Pés y Cia. S.A. e importada para o Brasil. Suas jazidas se localizam na área do Lago Pellegrini, na província de Rio Negro na Argentina (Figura 10).

De acordo com Herrmann (2001), as jazidas bentoníticas em volta do Lago Pellegrini se localizam na Formação Allen. Sua porção média, de rochas pelíticas (formada por partículas finas de silte ou argila) é a mais produtiva como portadora de horizontes bentoníticos. A importância da região é tal que recentemente foi definida como sub-região mineralogenética de bentonitas do Cretáceo Superior. Sua gênese se deveu à alteração de vidros vulcânicos provenientes de erupções do tipo piroclásticas, depositados em águas marinhas superficiais. Os depósitos são de disposição subhorizontal a horizontal, em extratos tabulares de cores claras. São bentonitas sódicas, como na maioria do país, e se trata de uma esmectita da série montmorilonita-beidelita, com uma pureza média de 95%. Ainda segundo o autor, o Lago Pellerini é uma depressão chamada Cuenca Vidal, que ocupa uma área de 24km por 14km. As bordas do lago formam uma planície constituída por materiais pelíticos e arenosos, limitada por barrancos com alturas de até 30m. A formação Allen tem aí uma espessura superior a 50m, com vários mantos bentoníticos exploráveis.

As características mineralógicas, químicas e físicas da Bentonita utilizada serão apresentadas no item 3.3.

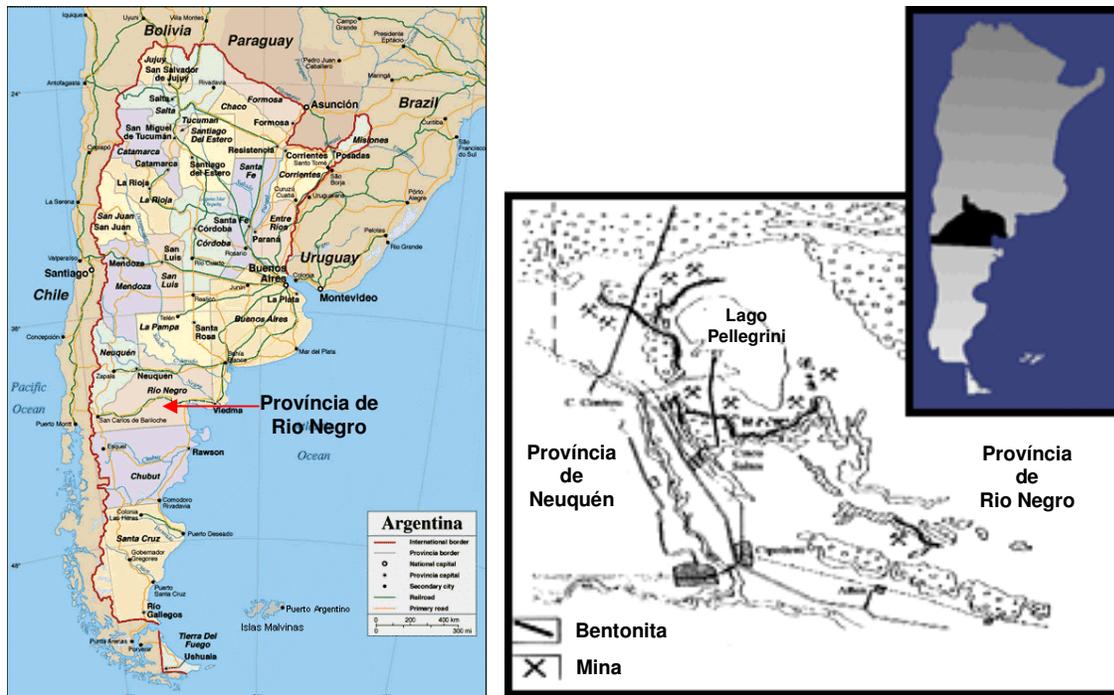


Figura 10 – Localização das jazidas de Bentonita em Rio Negro na Argentina (Herrmann, 2001).

O material granular utilizado neste trabalho são areias quartzosas secas e limpas, e suas características físicas serão apresentadas no item 3.3.

### 3.2. Preparação dos Solos Utilizados

Para a preparação dos solos utilizados neste trabalho, adquiriu-se 100Kg de Caulim e 100Kg de Bentonita. Além disso, foram separados 11 tipos de Material Granular (areias quartzosas) existentes no Laboratório de Geotecnia da PUC-Rio. Foram preparados 20kg de cada solo, quantidade necessária para a confecção de 08 corpos de prova por solo utilizados na realização dos ensaios de laboratório.

#### - Caulim

Para a preparação desse solo foram retirados 20kg dos 100kg do Caulim adquirido. Esse material foi separado, armazenado em sacos plásticos e devidamente identificado como C100, composto por 100% de caulim.

- **Caulim + Bentonita**

Com a mistura de Caulim e Bentonita foram preparados 03 solos diferentes nas proporções de 80% e 20%, 60% e 40% e 40% e 60% respectivamente. Foi feita uma mistura inicial em saco plástico, uma mistura manual em bandejas, completando o processo de mistura posteriormente com o quarteador para que o material obtido como resultado fosse o mais uniforme possível, visto que as quantidades misturadas eram relativamente grandes. Cada solo assim formado foi armazenado em sacos plásticos e devidamente identificado como C80, C60 e C40, respectivamente. Foram preparados 20Kg de cada um deles, sendo que para cada um, as misturas iniciais foram feitas de 5kg em 5kg, o que forneceu melhores condições de trabalho e um resultado mais uniforme.

- **Areia Mal Graduada (AMG)**

Desejava-se inicialmente preparar uma areia bem graduada (ABG) para ser analisada sozinha e misturada em diferentes proporções com caulim+bentonita. Para a preparação deste solo inicialmente foram analisados 11 tipos de material granular (MG), areias quartzosas, existentes no Laboratório de Geotecnia da PUC-Rio. Foi realizada uma análise granulométrica inicial de cada um deles, apenas por peneiramento, segundo os procedimentos especificados pela Norma Brasileira – NBR 7181/84. Os resultados desta análise estão apresentados na Figura 11.

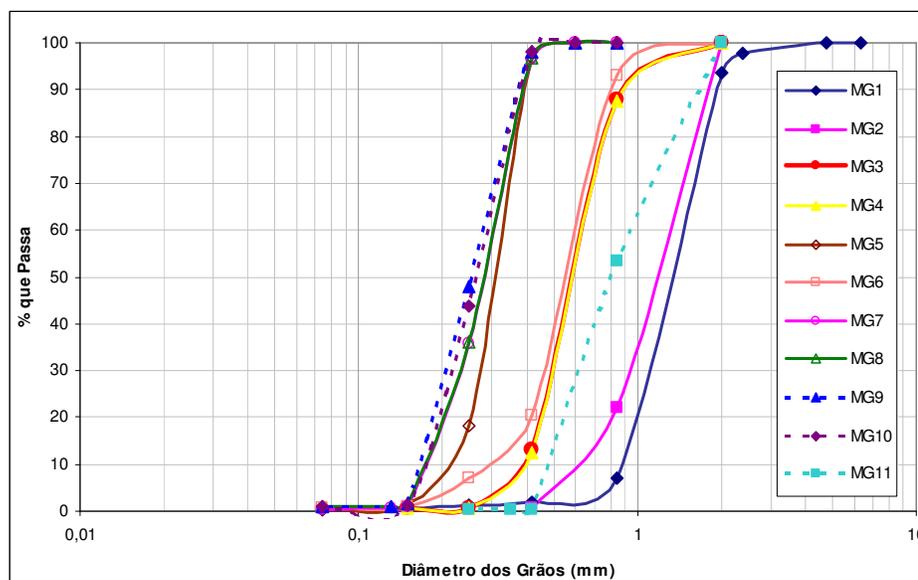


Figura 11 – Análise granulométrica inicial do material granular (areias quartzosas).

De acordo com as curvas granulométricas obtidas e apresentadas na Figura 11, todos os materiais analisados podem ser classificados como areias de acordo com o SUCS, com diâmetros das partículas variando entre 0,074mm e 4,76mm. Ainda de acordo com o Sistema Unificado de Classificação de Solos (SUCS), todos são SP, ou seja, areias mal graduadas e uniformes, sendo suas porcentagens de areia fina, média e grossa apresentadas na Tabela 4.

Tabela 4 – Porcentagens de areia fina, média e grossa das areias quartzosas.

| <b>Material Granular</b> | <b>A.Fina (%)</b> | <b>A. Média (%)</b> | <b>A. Grossa (%)</b> | <b>Conclusão</b> |
|--------------------------|-------------------|---------------------|----------------------|------------------|
| MG1                      | 2                 | 92                  | 6                    | A. Média         |
| MG2                      | 1                 | 99                  | 0                    | A. Média         |
| MG3                      | 13                | 87                  | 0                    | A. Média         |
| MG4                      | 12                | 88                  | 0                    | A. Média         |
| MG5                      | 96                | 4                   | 0                    | A. Fina          |
| MG6                      | 21                | 79                  | 0                    | A. Média         |
| MG7                      | 97                | 3                   | 0                    | A. Fina          |
| MG8                      | 97                | 3                   | 0                    | A. Fina          |
| MG9                      | 98                | 2                   | 0                    | A. Fina          |
| MG10                     | 98                | 2                   | 0                    | A. Fina          |
| MG11                     | 0                 | 100                 | 0                    | A. Média         |

Observou-se a partir das curvas apresentadas na Figura 11 e na Tabela 4 que alguns dos materiais analisados apresentaram distribuições granulométricas muito próximas, sendo que alguns tipos como MG1 e MG2, areias médias pelo SUCS (grãos entre 0,42mm e 2mm), poderiam ser misturados formando um só material. O mesmo aconteceu com os tipos MG3, MG4 e MG6, areias médias com uma porcentagem maior de grãos finos de areia, e também com MG7, MG8, MG9 e MG10, areias finas pelo SUCS (grãos entre 0,074mm e 0,42mm). Os materiais MG5, areia fina e MG11, areia média, não foram misturados.

Antes de realizar a mistura citada anteriormente, todo esse material granular foi observado em Lupa Binocular para posterior análise da influência de sua morfologia no índice de vazios e conseqüentemente em propriedades térmicas dos solos estudados. A Figura 12 mostra as fotografias tiradas na Lupa de cada material observado. O aumento na Lupa para todos eles foi de 10x.

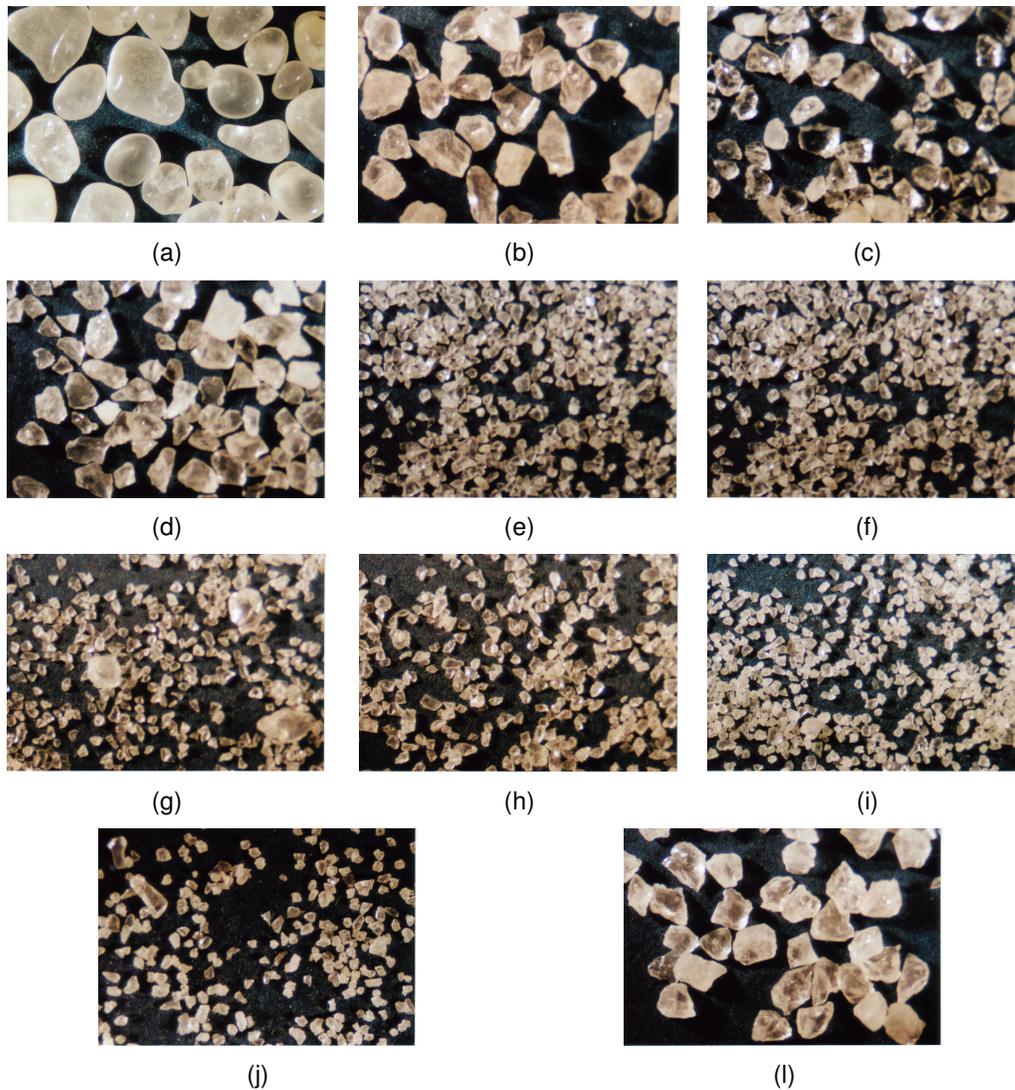


Figura 12 –Material granular: MG1 (a), MG2 (b), MG3 (c), MG4 (d), MG5 (e), MG6 (f), MG7 (g), MG8 (h), MG9 (i), MG10 (j) e MG11 (l).

A Figura 12(a) mostra que o material MG1 apresenta um aspecto muito natural, com grãos de quartzo hialinos (incolor, transparente) e leitosos (branco translúcido, embaçado), com arestas arredondadas, alguns grãos quase equidimensionais, formando esferas quase perfeitas, e outros com formas alongadas. Já os outros materiais se mostram com um aspecto mais artificial, com grãos de quartzo hialinos apresentando arestas vivas, como se fossem resultantes da moagem de granito.

A mistura de MG1 com MG2 formou um novo material denominado A1, MG3, MG4 e MG6 juntos formaram A2, MG7, MG8, MG9 e MG10 foram misturados formando o material A3, e os materiais MG5 e MG11 não foram misturados, mas foram denominados A4 e A5, respectivamente. As misturas

foram feitas com o auxílio de um quarteador, para que o novo material obtido como resultado fosse o mais uniforme possível, visto que as quantidades misturadas eram relativamente grandes. Foi feita uma mistura prévia em saco plástico, depois manual em bandejas, completando o processo de mistura posteriormente com o quarteador. A Tabela 5 apresenta de forma resumida, para melhor visualização, uma lista do material misturado e do material resultante.

Tabela 5 – Resumo das misturas do material granular.

| Material Granular<br>Misturado | Material Resultante |
|--------------------------------|---------------------|
| MG1 + MG2                      | A1                  |
| MG3 + MG4 + MG6                | A2                  |
| MG7 + MG8 + MG9 + MG10         | A3                  |
| MG5                            | A4                  |
| MG11                           | A5                  |

Novas análises granulométricas foram realizadas nesses materiais resultantes e suas curvas estão apresentadas na Figura 13.

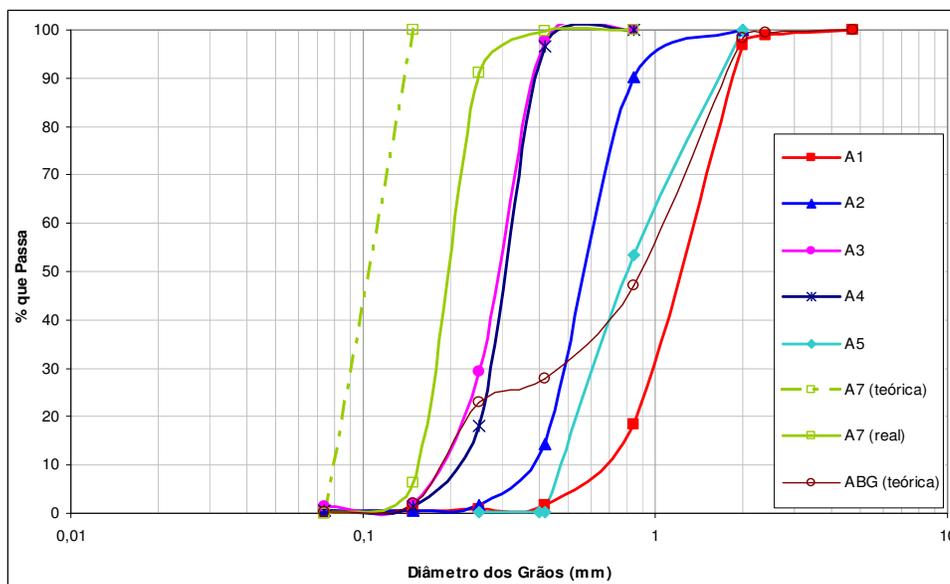


Figura 13 - Curvas granulométricas dos novos materiais granulares.

De acordo com as curvas granulométricas apresentadas na Figura 13, observa-se que as areias A1, A2 e A5 são médias, sendo que A2 apresenta uma porcentagem maior de grãos de areia fina, 14,3%, enquanto A1 apresenta 1,5%

e A5 não apresenta grãos finos de areia. A3 e A4 são areias finas. De acordo com o Sistema Unificado de Classificação de Solos são SP, ou seja, areias mal graduadas ou uniformes.

Na tentativa de se obter uma Areia bem graduada a partir desse novo material analisado, fez-se uma mistura teórica em planilha do Microsoft Excel até chegar a um resultado aceitável dentro das especificações do SUCS, ou seja, o coeficiente de não uniformidade (CNU) maior que 6 e o coeficiente de curvatura (CC) entre 1 e 3.

$$CNU = \frac{D_{60}}{D_{10}}; \quad CC = \frac{D_{30}^2}{D_{60} \cdot D_{10}}$$

onde:

CNU – coeficiente de não uniformidade

CC – coeficiente de curvatura

$D_{60}$ ,  $D_{10}$  e  $D_{30}$  - diâmetros equivalentes às porcentagens que passam de 60%, 10% e 30% na curva granulométrica.

Foram misturados, teoricamente, os materiais A1, A2, A3, A4 e A5, mas, não foi possível chegar a uma areia bem graduada a partir desse material disponível. Foi analisada então essa mistura teórica com o acréscimo de um novo material granular, de granulometria mais fina, cuja curva granulométrica teórica está apresentada na Figura 13 como A7 (teórica).

Oteve-se então uma areia bem graduada teórica, com um CNU de 8,36 e um CC de 1,92 através de uma mistura teórica dos materiais A1 (55%), A2 (11%), A4 (9%), A5 (13%) e A7 (teórica) (12%). Após vasta pesquisa de mercado para a realização da compra do material desejado, foram adquiridos então 20kg de areia fina, cujo diâmetro varia entre 0,42mm e 0,074mm. Esse material adquirido foi então analisado granulometricamente em laboratório e sua curva está também apresentada na Figura 13 como A7(real).

O material adquirido não foi exatamente igual granulometricamente ao material desejado, como pode ser visto a partir das curvas teórica e real apresentadas na Figura 13. Uma nova mistura teórica foi realizada, agora com o material A7 (real), e a areia bem graduada obtida com os materiais disponíveis também está apresentada na Figura 13 como ABG (teórica), com um CNU de 6 e CC de 1. As proporções a serem misturadas de cada material foram 55% de A1, 1% de A2, 3% de A4, 17% de A5 e 24% de A7 (real). Procedeu-se então a mistura dos materiais nas proporções definidas teoricamente. A mistura foi realizada inicialmente em sacos plásticos, de 5kg em 5kg, de forma manual em

bandejas, e com auxílio de um quarteador. Foram preparados 15kg desse solo, que foi armazenado em sacos plásticos e devidamente identificado como AMG.

- **Areia Uniforme (AU)**

A partir das curvas granulométricas apresentadas na Figura 13, decidiu-se trabalhar com a areia mal graduada e uniforme A3 devido a sua maior quantidade. Foram preparados 20kg desse solo, que foi separado, armazenado em sacos plásticos e devidamente identificado como AU.

- **Caulim + Bentonita + Areia mal Graduada**

Com a mistura de caulim, bentonita e areia mal graduada, foram preparados 03 solos diferentes, variando as proporções desses materiais. O solo CB80 apresenta 80% da mistura caulim e bentonita e 20% de areia mal graduada. O solo CB60 foi formado com uma percentagem de 60% de caulim e bentonita e 40% de areia mal graduada. Já o solo CB40 foi formado por 40% de caulim e bentonita e 60% de areia mal graduada. A mistura de caulim e bentonita escolhida para compor esses novos solos foi de 40% e 60%, respectivamente, devido a limitações na quantidade disponível de caulim. As misturas para cada solo foram feitas inicialmente em sacos plásticos, de 5kg em 5kg, depois manualmente em bandejas, concluindo-se a homogeneização com o auxílio do quarteador. Cada solo assim formado foi armazenado em sacos plásticos e devidamente identificado. Foram preparados 15kg de cada um desses solos.

### **3.3. Caracterização dos Solos Utilizados**

A fim de caracterizar os solos utilizados neste estudo e seus materiais componentes, foram feitos ensaios para a caracterização mineralógica, química e física.

#### **3.3.1. Caracterização Mineralógica**

Para caracterizar mineralogicamente os solos estudados, foram realizadas análises por Difração de Raios X nos componentes das frações mais finas dos solos, o Caulim e a Bentonita. A análise por difração de Raios X é o método mais rápido e preciso de identificação das espécies de argilominerais, entretanto,

outras técnicas como análise termo-diferencial (ATD), microscopia eletrônica e métodos químicos também podem ser empregados para identificá-las.

O ensaio de Difractometria por Raios X tem por finalidade identificar os argilominerais que constituem a fração argilosa dos solos estudados. A classificação dos argilominerais nos principais grupos exige o conhecimento da distância interplanar basal ( $d$ ), que é característica de cada composto cristalino e é o que permite a sua identificação. Quando o solo é exposto a um feixe monocromático de Raios X, cada cela unitária é capaz de difratar os Raios X. O feixe difratado é expresso através de picos que se destacam da linha de base, registrados num difratograma que relaciona intensidades de difração obtidas em ângulos  $2\theta$ .

Os instrumentos tradicionais de medida são o difratômetro (método do pó) e as câmaras de monocristais. O instrumento utilizado na realização destes ensaios foi um difratômetro de marca SIEMENS, modelo D5000, com dois goniômetros, que operou com emissão de feixe de radiação de Raios X, varrendo a faixa angular ( $2\theta$ ) variando de  $2,0^\circ$  a  $30,0^\circ$  na amostra de Caulim e de  $2,0^\circ$  a  $15,0^\circ$  na amostra de Bentonita, com passo de  $0,02^\circ$ , tempo de coleta por passo de 1s e temperatura de  $25^\circ\text{C}$ . Os ensaios de difratometria por Raios X foram realizados no Laboratório de Difração de Raios X do Departamento de Ciências dos Materiais e Metalurgia da PUC-Rio e os resultados estão apresentados na Figura 14.

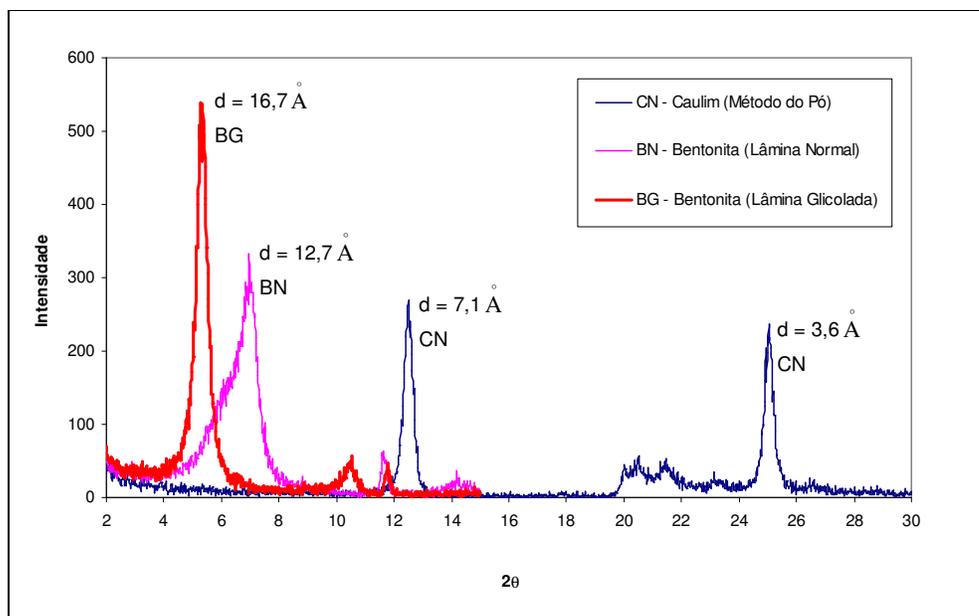


Figura 14 - Difratogramas de Raios X do Caulim e da Bentonita (lâminas normal e glicolada).

O resultado da análise do Caulim, realizada pelo método do pó, apresenta picos difratados característicos em  $d$  igual a  $7,1 \text{ \AA}$  e  $3,6 \text{ \AA}$ , indicando a presença do argilomineral caulinita. O resultado da análise feita com uma lâmina orientada da Bentonita apresentou pico difratado que corresponde ao valor de  $d$  igual a  $12,7 \text{ \AA}$ , indicando a presença de três possíveis argilominerais, esmectita, vermiculita ou clorita.

No grupo dos minerais que possuem a distância interplanar basal  $d$  entre  $12 \text{ \AA}$  e  $14 \text{ \AA}$ , a diferenciação é feita com base no tratamento das amostras por aquecimento ou glicolagem. As cloritas e vermiculitas não apresentam variação no valor de  $d$ , entretanto, as esmectitas têm o seu pico principal deslocado para valores de  $d$  entre  $16$  e  $18 \text{ \AA}$  quando tratadas com etilenoglicol.

Assim, uma nova análise realizada com uma lâmina glicolada da bentonita mostrou que o pico principal se deslocou para a esquerda do gráfico, aumentando o seu valor de  $d$  correspondente, que passou para  $16,7 \text{ \AA}$ , o que pode ser visto na Figura 14. Isto indica que o argilomineral analisado se expandiu quando tratado com etilenoglicol, sendo, portanto, uma esmectita.

### **3.3.2. Caracterização Química**

Foram realizados ensaios de Complexo Sortivo, Troca Catiônica (CTC), Ataque Sulfúrico e Teor de Sais Solúveis para analisar quimicamente o material argiloso utilizado, o Caulim e a Bentonita, e indicar o grau de pureza do mesmo. Os ensaios foram realizados no Laboratório de Solos da EMBRAPA/RJ e os resultados estão apresentados na Tabela 6.

O ensaio de Complexo Sortivo realizado indica quais são os cátions trocáveis presentes na amostra de solo ensaiada. As partículas (colóides) do solo apresentam cargas elétricas negativas e/ou positivas, sendo que as diferenças entre estas cargas induzem à retenção de cátions ou ânions. Este fenômeno, de extrema importância na natureza, é chamado troca ou adsorção iônica, podendo ser catiônica (CTC) ( $\text{Al}^{3+}$ ,  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$ ,  $\text{K}^+$ ,  $\text{Na}^+$ ,  $\text{NH}_4^+$ , etc) ou aniônica (CTA) ( $\text{NO}_3^-$ ,  $\text{PO}_4^{4-}$ ,  $\text{HPO}_4^{2-}$ ,  $\text{HCO}_3^-$ ,  $\text{SO}_4^{2-}$ , etc).

As cargas negativas no solo, que em geral superam as cargas positivas, são originárias de substituição isomórfica e dissociação do grupo OH. Em certos tipos de argilas, notadamente aquelas do tipo 2:1 como as esmectitas, alguns

átomos de  $Al^{3+}$  dos octaedros são substituídos por átomos de  $Mg^{2+}$ . Cada substituição resulta em uma valência (carga) negativa livre não atendida, uma vez que um átomo trivalente ( $Al^{3+}$ ) é substituído por um divalente ( $Mg^{2+}$ ). Do mesmo modo, em minerais como a illita e a beidelita, a substituição de átomo tetravalente ( $Si^{4+}$ ) dos tetraedros por átomo trivalente ( $Al^{3+}$ ) deixa uma valência (carga) negativa livre. Esse seria o processo de substituição isomórfica. A presença do grupo OH nas bordas de um cristal de argila ou da matéria orgânica pode levar à dissociação de  $H^+$ , havendo a formação de uma carga elétrica negativa. A Figura 15 apresenta uma visão esquemática da capacidade de troca catiônica dos solos.

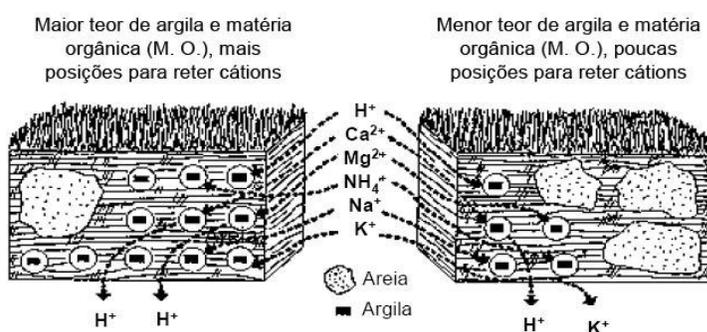


Figura 15 – Visão esquemática da Capacidade de troca catiônica (Lopes e Guidolin, 1989).

Como nos solos, em geral, predominam as cargas negativas, os estudos envolvendo CTC são mais comuns do que aqueles sobre CTA.

Tabela 6 – Resultados da Análise Química do Caulim e da Bentonita.

| Complexo Sortivo (cmol <sub>c</sub> /kg) |                  |                  |                |                 |                |                  |                |                |
|--|------------------|------------------|----------------|-----------------|----------------|------------------|----------------|----------------|
|  | Ca <sup>2+</sup> | Mg <sup>2+</sup> | K <sup>+</sup> | Na <sup>+</sup> | Valor S (soma) | Al <sup>+3</sup> | H <sup>+</sup> | Valor T (soma) |
| Caulim                                   | 2,8              | 0,1              | 0,03           | 0,2             | 3,1            | 2,9              | 2,1            | 8,1            |
| Bentonita                                | 28,2             | 10,6             | 0,37           | 14,32           | 53,5           | 0                | 0              | 53,5           |

|           | Ataque por H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> (1:1) – NaOH (0,8%) (g/kg) |                                | SiO <sub>2</sub> /Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (Ki) | 100Na <sup>+</sup> /T (%) | C.E. do extrato (mS/cm) 25°C | Sais Solúveis (extrato 1:5) (cmol <sub>c</sub> /kg de TF) |                 |
|-----------|--|--------------------------------|---|---------------------------|------------------------------|---|-----------------|
|           | SiO <sub>2</sub>   | Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> |   |                           |                              | K <sup>+</sup>  | Na <sup>+</sup> |
| Caulim    | 298  | 272                            | 1,86  | 2                         | 0,99                         | 0,01  | 1,1             |
| Bentonita | 266  | 142                            | 3,18  | 27                        | 8,01                         | 0,23  | 51,68           |

1 cmol/kg (centimol de cátion/kg da amostra) = 1 meq/100g (miliequivalente/100g da amostra)  
 mS/cm - milisiemens/cm

De acordo com os resultados apresentados na Tabela 6, observa-se que o Caulim analisado apresenta um valor muito baixo de troca catiônica ( $T=8,1\text{cmol}_e/\text{kg}$ ) em relação à Bentonita ( $T=53,5\text{cmol}_e/\text{kg}$ ), o que já era esperado. Segundo Mitchell (1993), a capacidade de troca catiônica varia em  $\text{meq}/100\text{g}$  de 3 a 15 na caulinita e de 80 a 150 em esmectitas, os principais argilominerais componentes dos materiais analisados. Observa-se ainda que a Bentonita utilizada é policatiônica, apresentando  $\text{Ca}^{2+}$  ( $28,21\text{cmol}_e/\text{kg}$ ),  $\text{Mg}^{2+}$  ( $10,6\text{cmol}_e/\text{kg}$ ) e  $\text{Na}^+$  ( $14,32\text{cmol}_e/\text{kg}$ ) como principais cátions trocáveis.

O ensaio de Ataque Sulfúrico ( $\text{H}_2\text{SO}_4$ ) realizado nas amostras de Caulim e Bentonita expressa o grau de pureza destes materiais e é uma análise química parcial, pois só ataca a fração ativa do solo. O ensaio fornece o valor do índice  $K_i$ , que é a relação entre as quantidades de sílica ( $\text{SiO}_2$ ) e alumínio ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) presentes nos solos, e serve para indicar o grau de intemperização dos mesmos. Valores mais elevados de  $K_i$  indicam menor grau de intemperização, valores mais baixos, maior grau. Os resultados apresentados na Tabela 6, mostram que o Caulim analisado apresenta um valor de  $K_i$  igual a 1,86, coerente com os solos cauliniticos que apresentam normalmente o valor de 2,0 para esta relação. Observa-se ainda que apesar de o Caulim analisado ser beneficiado (moído e peneirado) e rico em caulinita, ele não é composto somente por este argilomineral, visto que a caulinita pura apresenta uma porcentagem de sílica e alumínio de 46,54% e 39,5%, respectivamente. O teor de sílica presente neste Caulim é de 29,8%, portanto, a quantidade de caulinita presente é de 64,03%. A Bentonita analisada apresentou um valor de  $K_i$  igual a 3,18, com porcentagens de sílica e alumínio de 26,6% e 14,2%, respectivamente.

A Tabela 6 apresenta ainda valores de condutividade elétrica (CE) de 0,99 e  $8,01\text{mS}/\text{cm}$  para o Caulim e a Bentonita, respectivamente, indicando a presença bastante significativa de eletrólitos ou sais solúveis na Bentonita, ao contrário do Caulim. Pode-se observar através da mesma tabela que a quantidade de sódio ( $\text{Na}^+$ ) solúvel na Bentonita é bastante elevada ( $51,68\text{cmol}_e/\text{kg}$ ), comprovando que este solo é originário de uma região salina, resultante da inundação pela água do mar. É importante salientar que solos salinos se formam normalmente em regiões de clima árido ou semi-árido, com baixas precipitações e altas temperaturas, ou em regiões próximas ao mar. Depósitos de solos cauliniticos, se atacados por soluções salinas como a água do mar, podem transformar a caulinita em esmectita, visto que esse argilomineral é instável na presença de sais ou de soluções com pH alto.

### 3.3.3. Caracterização Física

A fim de caracterizar fisicamente os solos preparados e utilizados neste estudo, foram realizados ensaios para determinação da massa específica dos grãos, de curva granulométrica e dos limites de liquidez e plasticidade, de acordo com os procedimentos especificados pelas Normas Brasileiras da ABNT – NBR 6457/86, NBR 6508/84, NBR 7181/84, NBR 6459/84 e NBR 7180/84, respectivamente. Foram realizados ainda ensaios para determinação dos índices de vazios máximo e mínimo dos solos AMG (areia mal graduada) e AU (areia uniforme). Com os materiais argilosos Caulim e Bentonita ainda foram realizados ensaios para determinação das suas superfícies específicas através do Ensaio de CTC por Azul de Metileno (AM).

#### - Umidade Higroscópica

Para a determinação da umidade higroscópica dos solos utilizados, os mesmos foram secos ao ar até peso constante. Os resultados encontrados estão listados na Tabela 7.

Tabela 7 – Umidade higroscópica dos Solos utilizados.

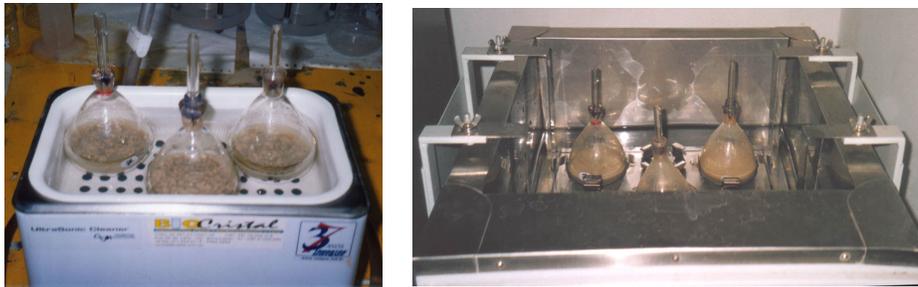
| Solo                            | C100 | C80  | C60  | C40   | Bentonita | CB80 | CB60 | CB40 |
|---------------------------------|------|------|------|-------|-----------|------|------|------|
| <b>Umidade Higroscópica (%)</b> | 1,91 | 4,86 | 7,36 | 10,55 | 14,03     | 9,66 | 8,83 | 7,27 |

#### - Densidade dos Grãos

Observaram-se alguns problemas para a determinação da massa específica dos grãos nos primeiros ensaios com o solo C100, formado somente por caulim. Pelo fato de este material ser de granulometria muito fina, a água adicionada aos picnômetros para a realização do ensaio não conseguia penetrar e molhar todo o solo contido nos mesmos (25g). Em função disso formava-se uma camada de solo seco aderida às paredes no fundo dos picnômetros, além da formação de grumos do material. Este problema foi agravado quando ainda nas primeiras determinações o material analisado continha bentonita em sua mistura, o caso dos solos C80, C60 e C40. Além de ser um material de granulometria fina, a bentonita sódica é altamente expansiva, causando problemas como formação de camada de solo seco no fundo dos picnômetros, formação de grumos, inchamento excessivo e perda de material durante a aplicação do vácuo, o que tornou impraticável o ensaio com uma massa de solo

de 25g. Várias tentativas foram feitas e adotou-se para este trabalho o seguinte procedimento complementar, usado para todos os solos contendo bentonita e caulim:

- Utilização de uma massa de solo de 10g;
- Adição e homogeneização do solo aos poucos dentro do picnômetro já tarado com uma determinada quantidade de água. Dessa forma, conseguiu-se molhar todo o solo e evitou-se a formação da camada de solo seco aderida ao fundo do picnômetro;
- Dispersão do material já dentro dos picnômetros, durante pelo menos 30min, utilizando um aparelho de ultra-som para evitar a perda de material e conseguir uma dispersão mais efetiva;
- Aquecimento até 60°C e agitação simultânea dos picnômetros em banho-maria durante pelo menos 15min, para auxiliar na retirada do ar antes da aplicação do vácuo.



(a)

(b)

Figura 16 - Procedimento complementar para ensaio de densidade dos grãos: dispersão em aparelho de ultra-som (a); aquecimento e agitação simultânea em banho-maria (b).

A bentonita é composta essencialmente pelo argilomineral montmorilonita. Segundo Lambe e Whitman (1969), a densidade dos grãos desse argilomineral varia de 2,74 a 2,78. Na Caulinita, principal componente do Caulim, esse valor varia de 2,61 a 2,66, e o Quartzo possui uma densidade de 2,65, considerando-se então coerentes os resultados encontrados nesta pesquisa e listados na Tabela 8.

Tabela 8 – Densidade relativa dos grãos dos solos (Gs).

| Solo      | Gs    | Solo | Gs    |
|-----------|-------|------|-------|
| Bentonita | 2,885 | AMG  | 2,644 |
| C100      | 2,637 | AU   | 2,648 |
| C80       | 2,66  | CB80 | 2,72  |
| C60       | 2,762 | CB60 | 2,738 |
| C40       | 2,792 | CB40 | 2,698 |

- **Análise Granulométrica**

Algumas observações foram feitas durante a realização dos ensaios de sedimentação das análises granulométricas. Inicialmente tentou-se trabalhar utilizando 100% de Bentonita como um dos solos a serem estudados, entretanto, no primeiro ensaio de sedimentação segundo os procedimentos da NBR 7181/84, tal material apresentou alguns problemas, já citados anteriormente para a determinação da densidade dos grãos. Além de ser um material de granulometria fina, onde a água não consegue penetrar e molhar toda a superfície dos grãos, a bentonita sódica é altamente expansiva e plástica, causando problemas como formação de grumos, inchamento excessivo e perda de material, o qual ficava aderido às paredes de qualquer recipiente de vidro, de plástico ou de metal, antes de ser iniciada a sedimentação, causando perda de material. O hexametáfosfato de sódio utilizado como defloculante produziu um efeito contrário à sua ação dispersante natural. O material ao invés de deflocular, floculou. Resolveu-se então adotar 04 procedimentos diferentes para realizar a sedimentação com a Bentonita, comparar os resultados e adotar para este trabalho uma metodologia única para os materiais que tivessem a bentonita em sua composição:

- 1- Procedimento normal de acordo com as recomendações da NBR 7181/84, usando o hexametáfosfato de sódio como defloculante;
- 2- Procedimento normal de acordo com as recomendações da NBR 7181/84, usando água destilada como defloculante, visto que a água é um dispersante natural;
- 3- Procedimento normal de acordo com as recomendações da NBR 7181/84, utilizando o dispersor mecânico, o aparelho de ultra-som para auxiliar na dispersão (durante pelo menos 15min) e água destilada como defloculante. Neste procedimento, o copo de aço inoxidável do dispersor mecânico, após esta dispersão, foi colocado dentro da cuba do aparelho de ultra-som com o material parcialmente disperso dentro dele, evitando-se assim perda de material devido à troca de recipientes.
- 4- Procedimento utilizando somente o aparelho de ultra-som como dispersor e água destilada como defloculante.

O problema da dispersão foi resolvido com a utilização do aparelho de ultra-som, mas durante o ensaio de sedimentação observou-se o aumento da viscosidade das soluções com o tempo ao invés da diminuição, ou seja, as leituras do densímetro ao invés de diminuírem aumentaram, e, conseqüentemente as curvas granulométricas não foram obtidas corretamente.

A Figura 17 apresenta os gráficos com os resultados das sedimentações realizadas com a Bentonita utilizando os quatro procedimentos citados nos parágrafos anteriores, mostrando que as curvas traçadas a partir das leituras realizadas não estão coerentes.

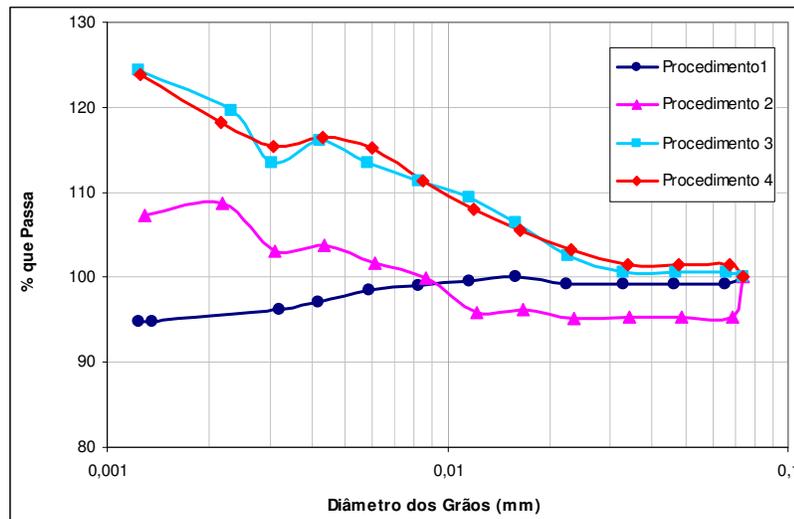


Figura 17 - Resultados das sedimentações com a Bentonita utilizando procedimentos diferentes.

De acordo com as curvas apresentadas na Figura 17, o comportamento mais próximo do normal num ensaio de sedimentação foi verificado utilizando o procedimento 1, com hexametáfosfato de sódio como defloculante, obtendo 95,2% de argila (grão menores que 0,02mm). Entretanto, pôde-se observar que a curva granulométrica com este procedimento sobe levemente na parte central, depois desce. As outras curvas sobem, resultando em porcentagens acima de 100% de argila.

Segundo Santos (1975), dispersões coloidais diluídas de bentonitas sódicas, e principalmente as concentradas de outros argilominerais, com um certo grau de defloculação apresentam o fenômeno da tixotropia. A suspensão torna-se menos rígida e viscosa (mais fina) pela agitação e torna-se mais espessa (gelifica) pelo repouso. É provável que esta seja a explicação para o comportamento observado com a Bentonita no ensaio de sedimentação. Dale e German (1964) e Worrall e Baser (1965), citados por Santos (1975) afirmam que a viscosidade e a tixotropia variam com o tempo (fenômeno de envelhecimento) e o fenômeno pode ser acelerado com ultra-sons, o que pode ser verificado nas

curvas resultantes dos procedimentos 3 e 4, onde se utilizou o aparelho de ultrassom na dispersão.

Dados os fatos, decidiu-se então trabalhar com no máximo 60% de bentonita nas misturas e formação dos solos, visto que não é o objetivo deste trabalho estudar o comportamento específico da Bentonita, e sim avaliar a influência da mineralogia em parâmetros térmicos de interesse. Decidiu-se também realizar os ensaios de sedimentação com os solos compostos por Bentonita de duas maneiras, uma de acordo com os procedimentos normais da NBR 7181/84, utilizando o hexametáfosfato de sódio como defloculante e outra utilizando água destilada como defloculante para comparar os resultados e avaliar a ação da água destilada como dispersante.

As sedimentações com os solos C100, C80, C60 e C40 foram realizadas e observou-se mais uma vez um comportamento similar ao da Bentonita, exceto para o solo C100. Este apresentou na sedimentação com o hexametáfosfato de sódio uma curva com 82,5% de argila e 17,5% de silte, com as leituras do densímetro diminuindo normalmente. Já na sedimentação usando água destilada como defloculante, o resultado foi de 100% de silte, ou seja, a água não atuou como defloculante, inicialmente o densímetro subiu, mas logo desceu, pois o material sedimentou rapidamente na proveta. A Figura 18 apresenta as curvas obtidas.

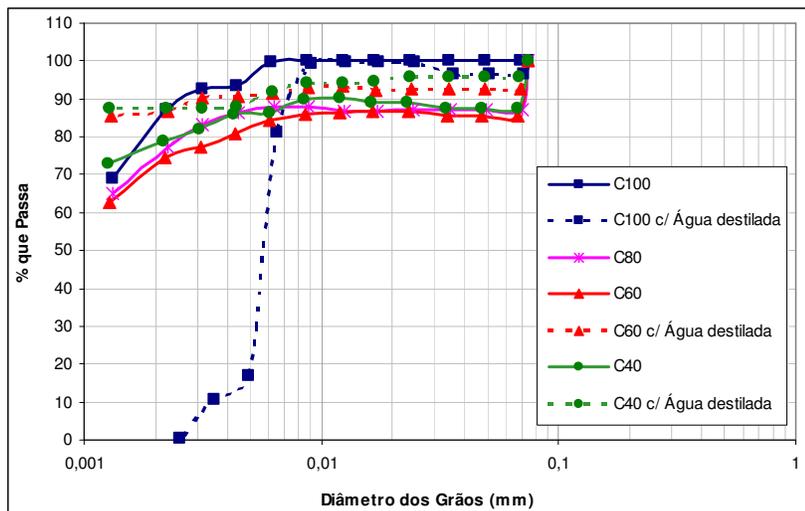


Figura 18 - Resultados das sedimentações realizadas com C100, C80, C60 e C40.

Como não foi observada ação eficiente da água destilada como substância defloculante em todos os casos, decidiu-se não utilizá-la em ensaios de sedimentação com os solos CB80, CB60 e CB40. Optou-se por executar tal

ensaio utilizando somente o hexametáfosfato de sódio como defloculante e analisar a coerência dos resultados, que por sinal não foram satisfatórios. Observou-se mais uma vez comportamento semelhante aos anteriores, resultando em curvas granulométricas incoerentes no ramo relativo às sedimentações. A Figura 19 apresenta estas curvas, onde se pode observar que as porcentagens diminuem, aumentam e depois diminuem ao longo do ensaio de sedimentação, ou seja, para partículas com diâmetro menor que 0,074mm.

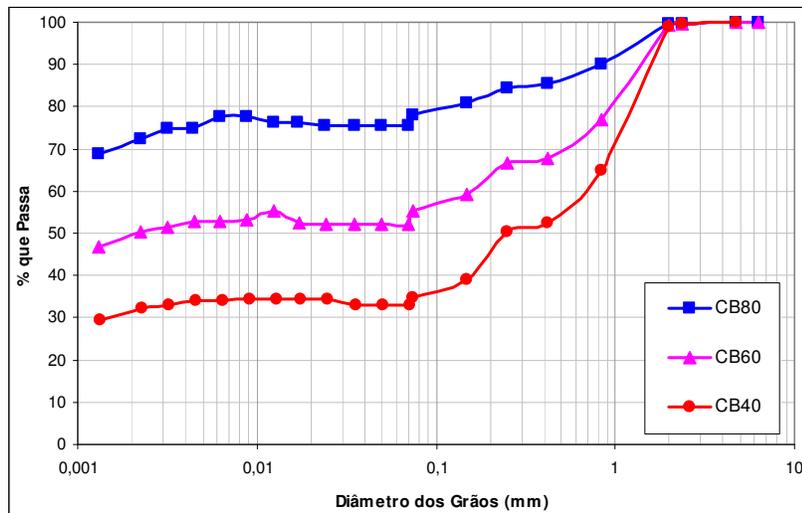


Figura 19 - Resultados das sedimentações realizadas com os solos CB80, CB60 e CB40.

Algumas hipóteses prováveis para explicar tais comportamentos nos ensaios de sedimentação estão listadas a seguir:

- 1- Poderia haver excesso de material sendo utilizado;
- 2- O material poderia ainda estar se hidratando na proveta, no início do ensaio, visto que só foi observado esse aumento da viscosidade nos materiais compostos por bentonita;
- 3- A Bentonita utilizada na composição dos solos tem um teor de sais solúveis significativo, como pôde ser visto a partir dos resultados da análise química na Tabela 6. Esses sais solúveis atuam como flocculantes, impedindo a dispersão dos componentes das amostras.
- 4- A propriedade tixotrópica das argilas montmorilníticas mencionada anteriormente.

De acordo com Pinheiro (1999), as partículas argilosas, pelo fato de possuírem pequenas dimensões e grande área superficial, apresentam atividade físico-química significativa. Estas partículas atraem íons quando estão em

suspensão na água e na presença de eletrólitos (sais em solução) formando ao seu redor uma camada de íons, cuja maior concentração se dá próxima à superfície da partícula. Essa superfície e a carga distribuída adjacente a ela são conhecidas como camada dupla, cuja espessura é responsável pelo comportamento de maior ou menor repulsão entre partículas coloidais influenciando as interações interpartículas de solos finos e determinando o estado floculado ou disperso do solo e a estabilidade da estrutura (Mitchell, 1993). Há aumento da tendência das partículas de solo floclarem com o aumento da concentração de eletrólitos, da valência iônica e da temperatura do meio, ou ainda, com a diminuição do pH, da constante dielétrica do meio, do tamanho do íon hidratado e da adsorção de ânions (Lambe e Whitman, 1969).

Segundo Jackson (1975, apud Alves (1990)), no processo de dispersão mineralógica, os sais solúveis, cátions trocáveis polivalentes e carbonatos, quando existentes, são removidos por lavagens sucessivas da amostra com uma solução tampão de NaOAc (pH=5), o que seria um tratamento químico. Os tratamentos químicos normalmente usados destinam-se à remoção de agentes floculantes (sais solúveis) e dos vários cimentos (carbonatos, matéria orgânica, óxidos de ferro livre, aluminossilicatos amorfos, sulfatos), que impedem a dispersão dos componentes da amostra, entretanto, Alves (1990) destaca que o uso indiscriminado de tratamentos químicos no processo de dispersão mineralógica é desaconselhado por vários autores, que já detectaram alterações significativas nos argilominerais por ação desses tratamentos. O ideal seria simplesmente dispersar a amostra em meio aquoso, sem aplicar nenhum tratamento químico, pois somente desta forma os argilominerais não seriam afetados. Portanto, o que poderia ser feito era lavar sucessivamente as amostras dos solos contendo bentonita com água destilada, até a remoção total dos sais solúveis, para posterior realização dos ensaios de sedimentação. Entretanto, para os objetivos deste trabalho, tal procedimento não seria aconselhado, em virtude do tempo que seria despendido e da relevância que este procedimento teria, ou seja, a dispersão do material seria para a execução do ensaio de sedimentação para o traçado da curva granulométrica de uma argila com grãos de diâmetro menor que 0,074mm. Na tentativa de se retirar os sais através de lavagem do material, diluiu-se e homogeneizou-se 30g de Bentonita em 2 litros de água destilada. O material deveria sedimentar e deixar um determinado volume de água limpa, contendo somente os sais na superfície, permitindo a retirada dessa água e adição de mais água limpa. A lavagem seria feita dessa forma, e a verificação da retirada dos sais poderia ser feita através da medição

da condutividade elétrica do material. Entretanto, o material foi deixado em repouso durante 12 meses na água e não ocorreu a sedimentação que permitiria a sua lavagem. Uma outra forma de se efetuar a lavagem seria através de uma centrífuga.

Uma montmorilonita sódica é facilmente dispersável em água, dando uma suspensão ou gel tixotrópico. Esse fenômeno é observado quando as soluções são deixadas em repouso: há um aumento gradual da viscosidade até a consolidação de um gel, que pode ser destruído, voltando ao estado líquido, por agitação violenta, mesmo em suspensões contendo 2% de argilomineral. A razão para o caráter tixotrópico da bentonita sódica reside na existência de uma camada espessa de água orientada (e razoavelmente rígida) que envolve a superfície de cada lâmina muito fina de montmorilonita. As camadas rígidas entrando em contato, todo o sistema fica rígido e forma-se um gel (Santos, 1975).

Considerando a hipótese de que poderia haver excesso de material sendo utilizado nos ensaios de sedimentação, decidiu-se trabalhar utilizando apenas 10g de solo ao invés de 30g. Os resultados obtidos não foram satisfatórios, os solos contendo bentonita em sua composição se comportaram da mesma forma na sedimentação, aumentando a sua viscosidade inicialmente e diminuído com o passar do tempo, fato este verificado mais uma vez através das leituras do densímetro. Tal fato obteve maior relevância quando se utilizou 10g de material ao invés de 30g.

Considerando a hipótese de que o solo poderia estar se hidratando dentro da proveta no início do ensaio, resolveu-se trabalhar hidratando o solo inicialmente, deixando-o em repouso dentro d'água por pelo menos 24h, depois do contato com o hexametáfosfato de sódio e de passar pelo dispersor mecânico. Os solos se comportaram da mesma forma na sedimentação, independente do tempo dado para a hidratação.

A provável explicação para o comportamento dos solos possuindo bentonita nas sedimentações é a ação conjunta da quantidade significativa de sais solúveis presentes na bentonita, atuando na sedimentação como floculante, e da atividade tixotrópica da bentonita, influenciando na sedimentação, visto que as soluções se tornam mais viscosas quando deixadas em repouso.

Segundo Santos (1975), não tem sentido medir a distribuição granulométrica de uma montmorilonita sódica, uma vez que variações de concentração da fase dispersa provocam uma separação ou agregação das camadas estruturais.

Com os solos AMG e AU, a análise granulométrica foi realizada através de peneiramento. O Solo AMG foi manipulado para ser uma areia bem graduada, mas apresentou uma diferença entre as curvas real e teórica que pode ser vista na Figura 20. Esta diferença transformou o material em areia mal graduada, com CC de 0,41 e um CNU de 5,56, com 34% de areia fina, 64% de areia média e 2% de areia grossa, trabalhando-se com o material obtido. O solo AU possui um CNU de aproximadamente 1,6, menor que 2, sendo portanto classificada como uma areia mal graduada e uniforme.

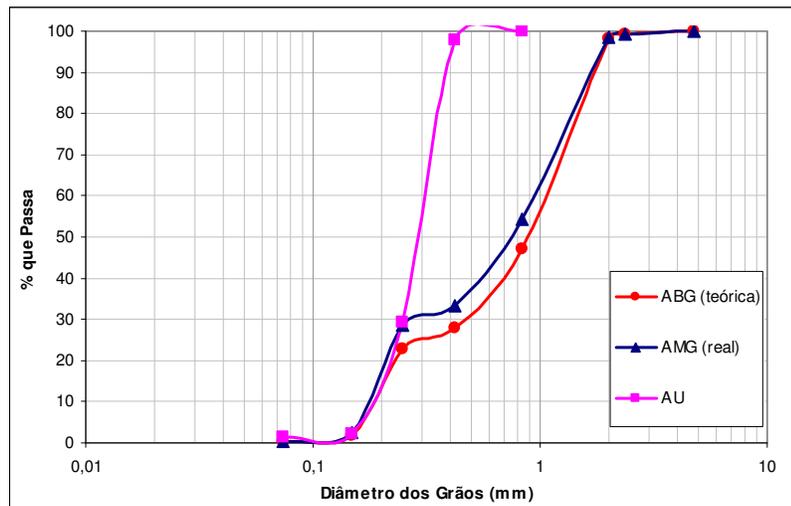


Figura 20 - Curvas Granulométricas dos solos AMG (real), ABG (teórica) e AU.

#### - Limites de Atterberg

Os Limites de Liquidez e de Plasticidade foram determinados segundo os procedimentos recomendados pelas NBR 6459/84 e NBR 7180/84, respectivamente. A Tabela 9 apresenta os resultados encontrados.

Se analisados os valores de LL para os Solos C100, C80, C60 e C40 apresentados na Tabela 9, na coluna referente ao material não hidratado (MNH), vê-se que os resultados relativos são coerentes, pois percebe-se que quanto maior a porcentagem de bentonita ou menor a de caulim nas amostras analisadas, maiores são os valores de LL.

Quando se analisam separadamente os resultados de LL dos solos CB80, CB60 e CB40 ainda considerando os materiais não hidratados (MNH), também se verifica coerência, pois quanto maior a porcentagem de areia na mistura, menor o valor obtido.

Entretanto, se analisados todos os resultados juntamente, considerando ainda o MNH, os valores encontrados não estão coerentes, por exemplo, o LL do

solo CB80 (216,25%), constituído por 80% de caulim e bentonita e 20% de areia mal graduada, deveria ser menor do que o LL do solo C40 (192,44%), constituído por 40% de caulim e 60% de bentonita, visto que a mistura de caulim e bentonita utilizada foi a mesma, entretanto, no solo CB80, há 20% de areia mal graduada, o que diminuiria o seu LL.

A diferença entre os valores de LL encontrados para as misturas contendo somente argila e as misturas contendo areia e argila está muito pequena, considerando que a bentonita usada nas misturas é altamente salina, precisando de um volume de água relativamente grande para se encontrar em estado de liquidez.

É provável que as incoerências apresentadas pelos resultados do material não hidratado (MNH) sejam devido à hidratação do material argiloso que ocorre lentamente e com a adição de uma quantidade significativa de água. Os ensaios com o MNH foram executados com adição de água.

Decidiu-se repetir os ensaios para a determinação do LL e do LP, hidratando todas as amostras inicialmente, e executando o LL por secagem, ao invés de ir acrescentando água. As amostras foram homogeneizadas e deixadas em repouso em água destilada, em recipientes dentro de sacos plásticos, até verificação visual de que o material não estava mais absorvendo água. Os valores obtidos com o material hidratado (MH) podem ser vistos na Tabela 9 e comparados com os obtidos anteriormente, com o material não hidratado (MNH).

Tabela 9 – Limites de Atterberg dos solos estudados.

| Solo      | MNH    |        |        | MH     |        |        |
|-----------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
|           | LL (%) | LP (%) | IP (%) | LL (%) | LP (%) | IP (%) |
| Bentonita | -      | -      | -      | 384,1  | 50,0   | 334,1  |
| C100      | 71,4   | 36,1   | 35,2   | 72,8   | 40,8   | 32,0   |
| C80       | 140,6  | 34,3   | 106,3  | 150,7  | 30,1   | 120,6  |
| C60       | 171,6  | 36,3   | 135,3  | 187,1  | 29,3   | 157,7  |
| C40       | 192,4  | 42,7   | 149,8  | 242,9  | 34,6   | 208,2  |
| CB80      | 216,3  | 35,3   | 181,0  | 225,4  | 39,8   | 185,5  |
| CB60      | 188,1  | 32,2   | 155,9  | 165,9  | 29,2   | 136,7  |
| CB40      | 149,2  | 17,7   | 131,5  | 142,8  | 20,1   | 122,7  |

MNH – Material não hidratado; MH – Material hidratado

Pode-se observar através dos resultados apresentados na Tabela 9 que os valores de LL aumentaram quando os solos foram hidratados antes de ensaiá-los, o que já era esperado, exceto para os solos CB60 e CB40, compostos por 40% e 60% de areia mal graduada. Os valores relativos de LL agora estão coerentes, ou seja, aumentam com o aumento da porcentagem de bentonita, e

diminuem com o aumento da porcentagem de areia nas misturas. Os valores de IP aumentaram após a hidratação do material para os solos C80, C60 e C40, que possuem bentonita em sua composição, e diminuíram um pouco para os solos CB60 e CB40, misturas contendo areias.

Os índices de atividade dos materiais não puderam ser calculados, pois a porcentagem exata de argila contida em cada mistura não pode ser determinada através das sedimentações.

- **Densidade Máxima e Mínima das Areias**

Com a areia mal graduada (AMG) e a areia uniforme foram realizados ensaios para a determinação dos índices de vazios máximo e mínimo em cilindros de compactação. Os resultados para os dois solos estão apresentados na Tabela 10.

Tabela 10 - Densidades máxima e mínima dos solos AMG e AU.

| Solo | $e_{\text{máx}}$ | $e_{\text{mín}}$ |
|------|------------------|------------------|
| AMG  | 0,66             | 0,31             |
| AU   | 1,18             | 0,73             |

- **Superfície Específica pelo Método de Azul de Metileno**

Para determinar a superfície específica do Caulim e da Bentonita e avaliar o seu potencial reativo, realizou-se o ensaio de Azul de metileno proposto por Casanova (1986).

Casanova (1986) sugeriu o método de Azul de Metileno (AM) para a determinação da CTC e da superfície específica (SE) de solos e argilas por sua rapidez, simplicidade e reprodutibilidade. Esta metodologia baseia-se no fato de que o azul de metileno ( $C_{16}H_{18}N_3SCl(3H_2O)$ ), quando em solução aquosa ou etanólica e em contato com materiais carregados negativamente, tem suas moléculas absorvidas rapidamente devido a um mecanismo de troca iônica irreversível. À medida que as posições de troca vão sendo preenchidas, a velocidade de absorção decresce, devido ao tamanho do cátion.

O ensaio consiste na titulação de uma suspensão do material a ser ensaiado, cujo pH se mantém neutro, com uma solução de azul de metileno. A capacidade de troca catiônica é obtida pela seguinte expressão:

$$CTC = C_{MBT} \times V_{MBT} \times 100 / W_a \quad (34)$$

onde:

CTC – capacidade de troca catiônica (meq/100g)

$C_{MBT}$  – concentração do azul de metileno (meq/100g)

$V_{MBT}$  – volume gasto do azul de metileno (L)

$W_a$  – peso da amostra seca corrigida (g)

A superfície específica (SE) em  $m^2/g$  é calculada a partir do volume gasto para saturar a superfície da amostra, ou seja, o volume absorvido pelos minerais argilosos. O fator que converte a CTC em superfície específica (SE) é igual a 7,8043 e está relacionado com as dimensões da molécula de azul de metileno.

$$SE = \text{fator de conversão} \times CTC. \quad (35)$$

Os ensaios foram realizados com o Caulim e a Bentonita no Laboratório de Interação Rocha-Fluído da PUC-Rio. A dosagem (volume final de azul de metileno) baseia-se na adição sucessiva de 1ml de solução na suspensão até que as partículas se encontrem saturadas por uma monocamada do azul de metileno, que se caracteriza pelo ato de pingar uma gota da suspensão sobre um papel-filtro, Whatman nº40, e observar a formação de uma auréola azul-clara ao redor da porção sólida. A Figura 21 apresenta os resultados do ensaio.

A Figura 21 mostra os resultados do ensaio apresentando para o Caulim um capacidade de troca catiônica em meq/100g entre 19 e 21, e conseqüentemente uma superfície específica entre 148 e 164  $m^2/g$ . Já a Bentonita apresentou um valor de CTC entre 65 e 80meq/100g e uma superfície específica entre 507 e 624  $m^2/g$ . Os valores de superfície específica segundo Mitchell (1993) são da ordem de 10 a 20  $m^2/g$  para as caulinitas e de 50 até 840  $m^2/g$  para as esmectitas.

A Tabela 11 lista os resultados obtidos através do método de Azul de Metileno e compara com os valores determinados a partir da análise química.

Tabela 11 - CTC e Superfície Específica do Caulim e da Bentonita.

|           | CTC (meq/100g) | Superfície Específica ( $m^2/g$ ) |
|-----------|----------------|-----------------------------------|
| Caulim    | 19 - 21 (AM)   | 148 - 164                         |
|           | 8,1 (AQ)       | 63,2                              |
| Bentonita | 65 - 80 (AM)   | 507,3 - 624,3                     |
|           | 53,5 (AQ)      | 417,5                             |

AM – Azul de Metileno; AQ – Análise Química

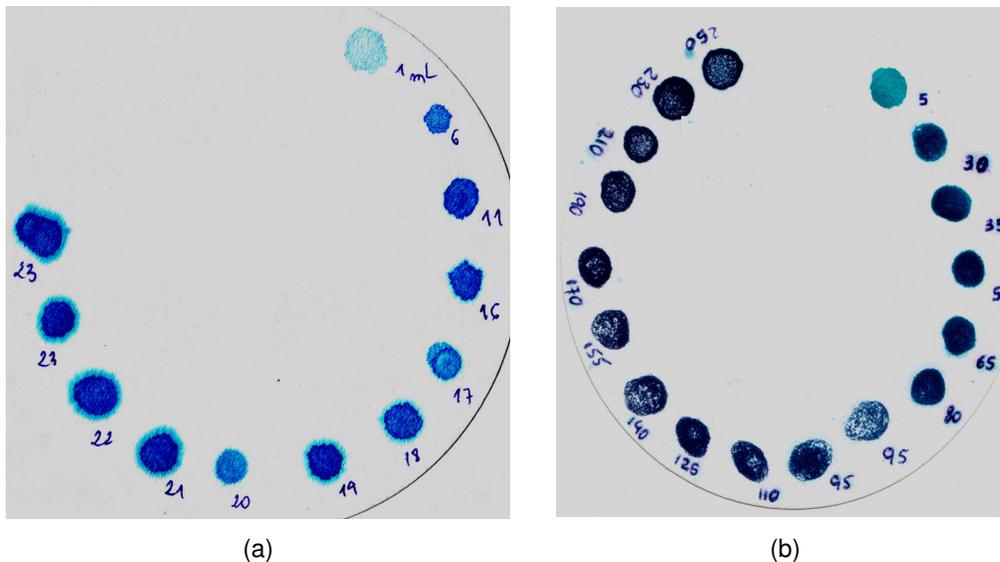


Figura 21 - Resultados do ensaio de CTC pelo método de Azul de Metileno: Caullim (a); Bentonita (b).

Se comparados os resultados de CTC encontrados através deste ensaio (AM) e os resultados encontrados através da Análise Química (Tabela 6), percebe-se uma diferença significativa entre os resultados encontrados tanto para o Caullim quanto para a Bentonita. O método de Azul de Metileno proposto por Casanova (1986) para determinar a CTC dos solos é questionável, pois fornece valores muito acima dos mencionados na literatura para os dois materiais em questão. Este método fornece apenas valores indicativos, enquanto que os valores de CTC determinados através da Análise Química são mais precisos. Portanto, os valores de Superfície Específica calculados através dos resultados de CTC da Análise Química são mais confiáveis.

### 3.4. Classificação dos Solos Utilizados

A partir das análises granulométricas e das características de plasticidade dos solos foi possível a sua classificação através do Sistema Unificado de Classificação dos Solos (SUCS). O solo C100, que é composto somente por caullim, apresenta uma porcentagem de 100% (>50%) passante na peneira de 200mm, limite de liquidez (LL) de 72,8% e índice de plasticidade de 32%, foi classificado a partir da Carta de Plasticidade de Casagrande como Argila de Alta Plasticidade (CH). Os solos C80, C60, C40, CB80 e CB60 também foram classificados como Argilas de Alta Plasticidade (CH). Seus valores de IP, LL e

porcentagem de solo passante na peneira de 200mm estão resumidos na Tabela 12. O solo CB40, que possui uma porcentagem de solo passante na peneira de 200mm de 40% (<50% e >12%) e LL e IP de 142,8% e 122,7%, respectivamente, foi classificado como Areia Argilosa de acordo com o SUCS. A Tabela 12 apresenta características dos solos usadas na classificação pelo SUCS.

Tabela 12 – Características usadas e Classificação dos solos pelo SUCS.

| <b>Solo</b> | <b>% passante na # 200mm</b> | <b>LL (%)</b> | <b>IP (%)</b> | <b>Classificação (SUCS)</b>       |
|-------------|------------------------------|---------------|---------------|-----------------------------------|
| C100        | 100                          | 72,8          | 32,0          | Argilas de Alta Plasticidade (CH) |
| C80         | 100                          | 150,7         | 120,6         |                                   |
| C60         | 100                          | 187,1         | 157,7         |                                   |
| C40         | 100                          | 242,9         | 208,2         |                                   |
| CB80        | 80                           | 225,4         | 185,5         |                                   |
| CB60        | 60                           | 165,9         | 136,7         | Areia Argilosa (SC)               |
| CB40        | 40                           | 142,8         | 122,7         |                                   |