

5

DESCRIÇÃO DOS ENSAIOS E APRESENTAÇÃO DOS RESULTADOS

Neste capítulo serão abordados os ensaios realizados para obtenção de parâmetros geotécnicos, assim como as observações e medições de campo que auxiliam no entendimento dos processos erosivos atuantes na região. Sendo assim, foram realizados ensaios de campo (penetrométrico – SPT e de condutividade hidráulica – Permeâmetro de Guelph) e de laboratório, tais como: de caracterização física, como limites de liquidez e plasticidade, análise granulométrica por peneiramento e sedimentação, densidade dos grãos, MCT (mini-MCV), além de mineralogia por difração de Raios – X, das frações (silte + argila) e argila nas peneiras 200 e 400, respectivamente.

Somente ensaios de caracterização e visualização de campo, não são parâmetros satisfatórios para que se avalie mecanismo de erosões atuantes. Faz-se necessário, um aprofundamento desses estudos, através dos ensaios específicos e inerentes ao caso.

Dessa forma, procedeu-se aos ensaios de erodibilidade, de permeabilidade e ensaios especiais, utilizando-se quatro gêneses de amostras de solos representativos das erosões locais, as quais foram coletadas e classificadas em ordem crescente de profundidade e definidas como solo Coluvionar (SC), solo Residual Maduro (SRM), solo Residual Jovem A (SRJ-A) e solo Residual Jovem B (SRJ-B), incluindo-se em alguns ensaios, uma capa de solo laterítico, a qual denominou-se de solo erodido (SE) e não erodido

(SNE), classificando-os dessa forma, mediante a um maior ou menor grau de erodibilidade, atribuído a eles.

5.1. Ensaios de Campo

5.1.1. Ensaio Penetrométrico (SPT)

Como já citado anteriormente, este ensaio teve como finalidade determinar os teores de umidade natural do solo e da retirada de amostra amolgada, para comparação da gênese do solo ao longo das paredes das erosões contidas na área de estudo e indicar o comportamento da água de sub-superfície nestas, (Figuras 3.2, 4.7 e anexos)

Não sendo notadas evidências de deslizamentos importantes no fundo e ao longo das paredes de erosão estudada, em relação à convergência das linhas de fluxo para o nível d'água (N.A.), na base dos taludes da erosão estudada e demais casos em ocorrência.

5.1.2. Ensaio com o Permeâmetro de Guelph

Devido às incertezas quanto às diferenças de permeabilidade existentes entre as camadas de solos com vegetação e uma outra desprovida de cobertura vegetal e densamente compactada, optou-se pela realização do ensaio de permeabilidade "in situ", com a utilização do permeâmetro de Guelph modelo 2800 K1, pertencente ao laboratório de solos da PUC-Rio, (Figura 5.1), ao longo da Erosão 1 e de uma área próxima a sua cabeceira, que apresenta feições distintas devido ao mecanismo de erosão diferencial atuante, cujos pontos foram previamente selecionados e plotados (Figura 4.3).

Esse ensaio consiste em estabelecer um fluxo de água de regime permanente em solos não saturados, através de furos a trado nos quais uma

lâmina d'água, com pequena altura, é mantida constante (Reynolds *et al.*, 1985).

Como complemento e confirmação dos resultados de permeabilidade obtidos no campo, optou-se também por realizar ensaio de laboratório. Para a permeabilidade medida em laboratório, utilizou-se um permeâmetro de carga variável (PCV), com gradiente hidráulico de 10, estabelecido a partir de uma coluna d'água igual a 137,30cm de altura, para um corpo de prova de altura e diâmetro iguais a 13,73 e 10,0cm, respectivamente.



Figura 5.1 – Ensaio com Permeâmetro de Guelph

Para os solos estudados, obteve-se em laboratório, uma permeabilidade média (K_m) cujos valores inerentes a cada gênese são: Solo Coluvionar ($K_m = 2,30E-03$ cm/s); Solo Residual Maduro ($K_m = 2,48E-05$ cm/s); Solo Residual Jovem A ($K_m = 3,80E-05$ cm/s) e Solo Residual Jovem B ($K_m = 6,44E-05$ cm/s), conforme representação gráfica da Figura 5.2.

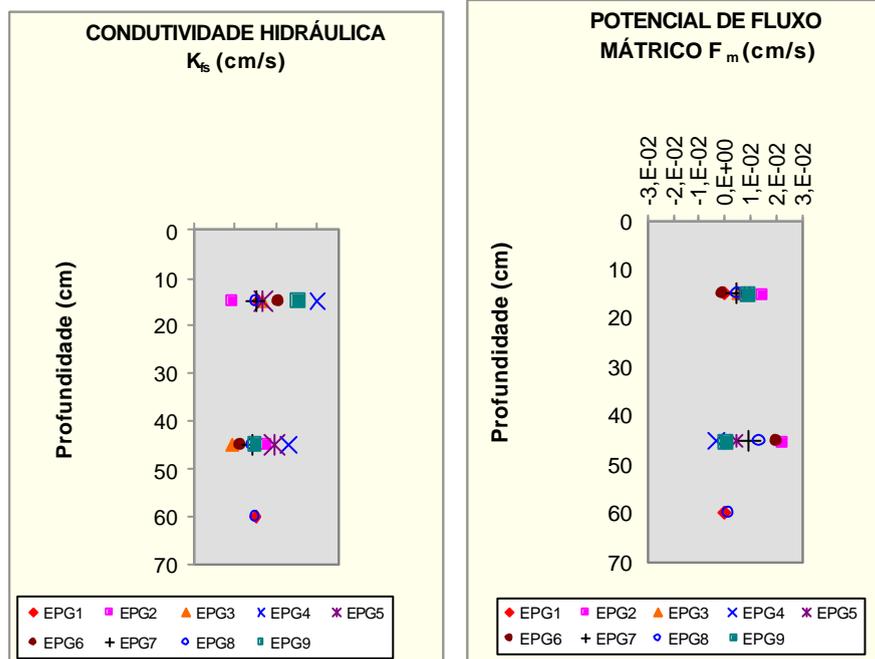
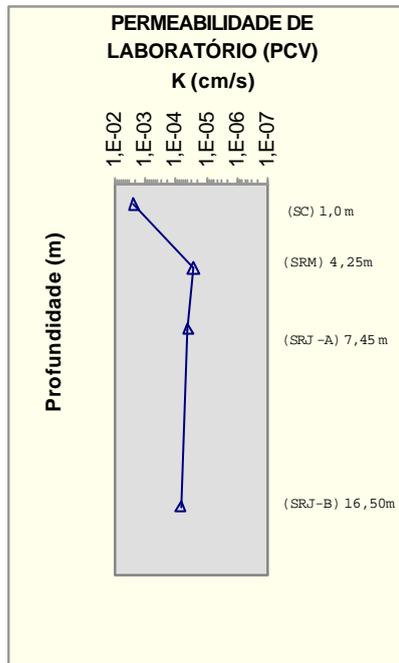


Figura 5.2 – Valores de K (cm/s), K_s (cm/s) e F_m (cm/s)

As permeabilidades “*in situ*”, foram obtidas através da utilização do permeâmetro de Guelph, ao longo da Erosão 1, com profundidades a partir da superfície de 15 a 45 cm, para os ensaios referentes aos pontos EG2 a EG7 e

15,45 e 60cm para os ensaios realizados nos pontos EG1 e EG8, respectivamente (Figura 4.3). Onde foram observadas as condutividades hidráulicas, para os furos com profundidades de 15, 45 e 60 cm, cujos resultados são ($K_{fs} = -1,18E-03$ a $4,15E-05$ cm/s); ($K_{fs} = -7,71E-04$ a $9,02E-04$ cm/s); ($K_{fs} = 0,00E+00$ a $2,02E-05$ cm/s), respectivamente. Apresentando como valores para o potencial de fluxo mátrico para os mesmo furos ($F_m = -4,86E-04$ a $8,91E-03$ cm/s); ($F_m = -3,02E-03$ a $9,21E-03$ cm/s) e ($F_m = 0,00E+00$ a $1,42E-03$ cm/s), respectivamente.

Os resultados negativos medidos nos ensaios com a utilização do permeâmetro de Guelph podem indicar heterogeneidade do solo, sendo esses um indicativo de descontinuidade hidrológica tipicamente causada pela estratificação do solo e presença de orifícios, buracos no solo no entorno dos furos.

Para os resultados de permeabilidade positiva, com a utilização do permeâmetro de Guelph, pode-se dizer que estes apresentam uma boa correlação com os resultados de permeabilidade de laboratório, para as mesmas gêneses de solos, principalmente para as camadas mais próximas da superfície.

5.2. Ensaios de Laboratório

Os critérios utilizados para a escolha dos ensaios, foram focados na obtenção de parâmetros geológico-geotécnicos, definindo-os a partir das observações e condições de campo, nas quais constatou-se na maioria das erosões o aparecimento de trincas de tração, taludes praticamente verticais apresentando em alguns pontos alcovas negativas, além da grande quantidade de blocos de solos depositados no fundo dessas erosões e a surgência do lençol freático no seu interior, independentemente do tipo de solo e condições ambientes a que estejam submetidos.

Desta forma optou-se por dois tipos de avaliação a primeira referente a susceptibilidade através da correlação com as características do solo, visando um melhor conhecimento das suas propriedades física e química. Como por exemplo:

- a sua granulométrica;
- limite de Atterberg;
- densidade dos grãos;
- mini-MCV;
- Caracterização mineralógica através do ensaio de Raios-X;
- ensaio de sucção.

Outra maneira de se buscar uma previsão para ocorrências erosivas é através dos ensaios quantitativos ou de erodibilidade, como os propostos:

- ensaios de desagregação;
- Inderbitzen;
- pinhole test;
- resistência à tração.

Os ensaios acima foram realizados nos laboratórios de Furnas Centrais Elétricas S.A., Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, cabendo à Universidade de Brasília a cessão do equipamento para realização do ensaio de Inderbitzen.

5.3. Ensaios Convencionais de Caracterização

5.3.1. Metodologia Adotada

Os procedimentos para os ensaios de caracterização foram desenvolvidos segundo as seguintes recomendações da Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT):

- NBR 6457/1986 – Amostra de Solos – Preparação para Ensaios de Compactação e Caracterização
- NBR 2887/1988 – Massa Específica Natural
- NBR 6508/1984 – Massa Específica Real dos Grãos
- NBR 6457/1986 – Teor de Umidade Natural
- NBR 6459/1984 – Solo – Determinação do Limite de Liquidez
- NBR 7180/1984 – Solo – Determinação do Limite de Plasticidade
- NBR 7181/1984 – Solo – Análise Granulométrica
- NBR 13602/1996 – Solo – Avaliação da dispersibilidade de solos argilosos pelo ensaio sedimentométrico comparativo-Ensaio de Dispersão (SCS).

A partir dos ensaios de limite e distribuição granulométrica, foram também determinados por fórmulas, os seguintes índices físicos:

- Índice de plasticidade (w_p , %), obtido pela diferença entre o limite de liquidez (w_l , %) e o limite da plasticidade (w_p , %)
- Índice de atividade das argilas (I_a), determinado segundo proposta por Skempton, como:

$$I_a = \frac{\text{Índice de Plasticidade (I}_p\text{)}}{\% < 2 \, m_n \text{ (fração argila)}} \quad (1)$$

Classificação segundo a fração argila presente no solo:

- $I_a < 0,75$ inativas
- $1,25 > I_a > 0,75$ atividade normal
- $I_a > 1,25$ ativa

Com as amostras indeformadas, obteve-se:

- peso específico real dos grãos $\gamma_s = \rho_s \times g^*$, sendo ρ_s (massa específica real dos grãos e $g^* \approx 9,81\text{m/s}^2$ (aceleração da gravidade)
- peso específico natural $\gamma_{nat} = \rho_{nat} \times g^*$, sendo, ρ_{nat} (massa específica natural e $g^* \approx 9,81\text{m/s}^2$
- peso específico seco $\gamma_d = \gamma_{nat}/(1+w_{nat})$, sendo w_{nat} a umidade natural do solo.
- Índice de vazios (e), determinado pela equação: $e = (\gamma_s/\gamma_d) - 1$
- porosidade (n, %), determinada a partir da equação: $n = e / (1 + e)$
- grau da saturação (S,%), obtida através da equação: $S = \gamma_s W_{nat} / e \cdot \gamma_w$, sendo W_{nat} a umidade natural do solo e $\gamma_w \approx 10 \text{ KN/m}^3$, com o peso específico da água a 4^oc.

5.3.2. Apresentação e Análise dos Resultados

A seguir observa-se a tabela representativa com os resultados obtidos a partir de ensaios de caracterização física dos solos:

Tabela 5.1 - Resumo das Principais propriedades Físicas do Solo

AMOSTRA		SC	SRM	SRJ-A	SRJ-B	
PROFUNDIDADE MÉDIA (m)		1,0	4,25	7,45	16,50	
UMIDADE	Natural	(w_{nat} ; %)	16,1	16,8	17,2	26,4
		(w_{nat} (SPT); %)	19,8	20,2	25,52	28,2
	Higroscópica	(w_h ; %)	13,0	7,7	6,9	4,5
MASSA ESPECÍFICA	Real dos Grãos (ρ_s ; g/cm ³)		2,717	2,770	2,703	2,715
	Natural (ρ_{nat} ; g/cm ³)		1,413	1,586	1,953	1,872
PESO ESPECÍFICO	Real dos Grãos (γ_s ; kN/m ³)		27,17	27,70	27,03	27,15
	Natural (γ_{nat} ; kN/m ³)		14,13	15,86	19,53	18,72
	Seco (γ_d ; kN/m ³)		12,17	13,58	16,66	14,81
LIMITE	Liquidez (w_L ; %)		42	54	39	34
	Plasticidade (w_p ; %)		25	35	25	26
ÍNDICE	Plasticidade (I_p ; %)		17	19	14	8
	Vazio (e)		1,23	1,04	0,62	0,83
POROSIDADE (n ; %)		55	51	38	45	
GRAU DE SATURAÇÃO (S_r ; %)		35,6	44,8	75,0	86,4	
FRAÇÃO	Pedregulho (%)		3,0	—	—	—
	Areia (%)		28,0	26,0	42,0	48,0
	Silte (%)		24,0	58,0	50,0	42,0
	Argila (%)		45,0	16,0	8,0	10,0
ÍNDICE DE ATIVIDADE (I_a)		0,38	1,19	1,0	1,4	

Legenda:

(SC): Solo Coluvionar

(SRJ-B): Solo Residual Jovem B

(SRM): Solo Residual Maduro

(SPT)* - Standard Penetration Test

(SRJ-A): Solo Residual Jovem A-

5.3.2.1. Análise Granulométrica

Uma proposta de avaliação indireta da correlação entre erodibilidade e diversas propriedades dos solos, como por exemplo, a sua granulometria, é citada em estudos apresentados por Santos (1953) e Santos e Castro (1967), que definem o seguinte critério de avaliação para solos.

Solos classificados com comportamento de bom a regular como sendo aqueles cujos valores estão compreendidos entre 49 a 96% da porcentagem que passa na peneira (#) 40. Ou correlacionando a granulometria a um outro parâmetro atribuído a letra “a”, como estando compreendido entre 52 e 96%, inclusive, sendo $a = \Sigma\gamma/100n$; onde γ é igual ao somatório das porcentagens dos grãos passando nas peneiras de números 7, 14, 25, 50, 100 e 200 da curva granulométrica sendo $n = 6$ (número de peneiras utilizadas).

Tabela 5.2 – Critério de classificação direta dos solos estudados quanto ao grau de erodibilidade, proposto por Santos e Castro (1967)

CLASSIFICAÇÃO DO SOLO				
# 40	SC	SRJ-B	SRJ-A	SRM
$a = Sg/100n$	SRJ-B	SC	SRJ-A	SRM

Dessa forma, a Tabela 5.2 mostra a aplicação desse critério para os solos estudados, com a classificação destes em escala crescente quanto ao grau de erodibilidade inerente a cada solo, ou seja, do solo menos erodível para o mais erodível.

Alcântara (1997), define a granulometria como sendo a propriedade mais estudada na tentativa de se avaliar o grau de erodibilidade de um solo, e que solos mais erodíveis, são os que apresentam predominância da fração silte e areia muito fina e com baixo teor de argila, ou seja, solos finos com comportamento mais granular.

Poesen (1981) citado por Guerra (1998), observou que as areias apresentam os maiores índices de erodibilidade e que o teor de silte também afeta a erodibilidade dos solos. Ainda segundo o autor, alguns pesquisadores demonstram que, quanto maior o teor de silte, maior a susceptibilidade dos solos a sofrerem processos erosivos.

Para um melhor entendimento deste tópico, os resultados dos ensaios de granulometria por peneiramento e sedimentação com o uso de defloculante (hexametáfosfato de sódio, com concentrações de 45,7 g/l), são representados sob a forma de gráficos com as curvas de distribuição granulométrica de cada solo (Figura 5.3) e a variação dessa com a profundidade estudada (Figuras 5.4 e 5.5). Sendo a porcentagem de cada material calculada segundo os critérios da escala granulométrica da ABNT.

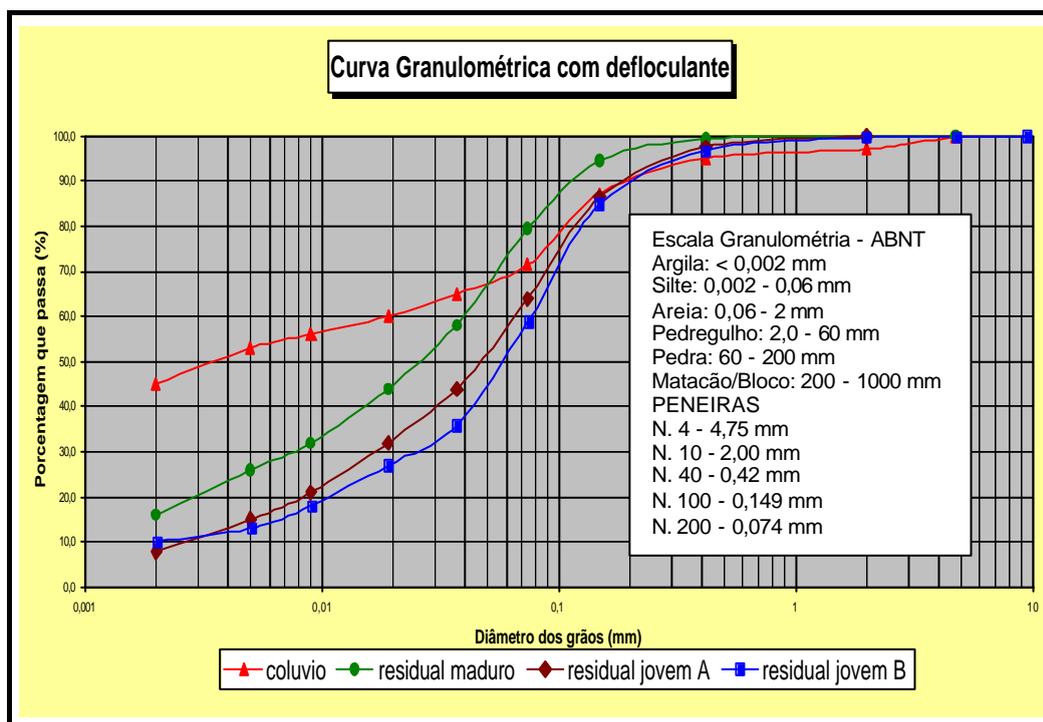


Figura 5.3 – Curva Granulométrica por peneiramento e sedimentação

As tendências de correlações foram obtidas a partir das curvas granulométricas por peneiramento e sedimentação, para os solos ensaiados em

laboratório, conforme mostra a Figura 5.3, cujos valores encontram-se representados na Tabela 5.1.

Com exceção da curva granulométrica representativa do solo coluvionar, que apresenta uma ligeira distorção em relação às demais curvas do solo, obtidas a partir do ensaio granulométrico por peneiramento e sedimentação. As outras curvas apresentam um comportamento bastante semelhante entre si. Revelando de certa forma, uma uniformidade granulométrica entre elas ao longo do perfil analisado.

A influência do meio dispersor na desagregação do solo pode ser observada nas amostras submetidas ao ensaio de granulometria por sedimentação (Figura 5.3), sobre o qual pode-se tecer os seguintes comentários:

- apenas o horizonte da camada superior, solo coluvionar, apresenta uma certa quantidade representativa da fração argila, que pode ser devido à presença de matéria orgânica ou ainda de argilominerais dispersivos na fração fina do solo, o que pode ser justificado por uma curva de forma mais contínua.
- com relação às demais gêneses do solo estudado, essas apresentam curvas granulométricas mais representativas com as condições da distribuição das frações granulométricas presentes.

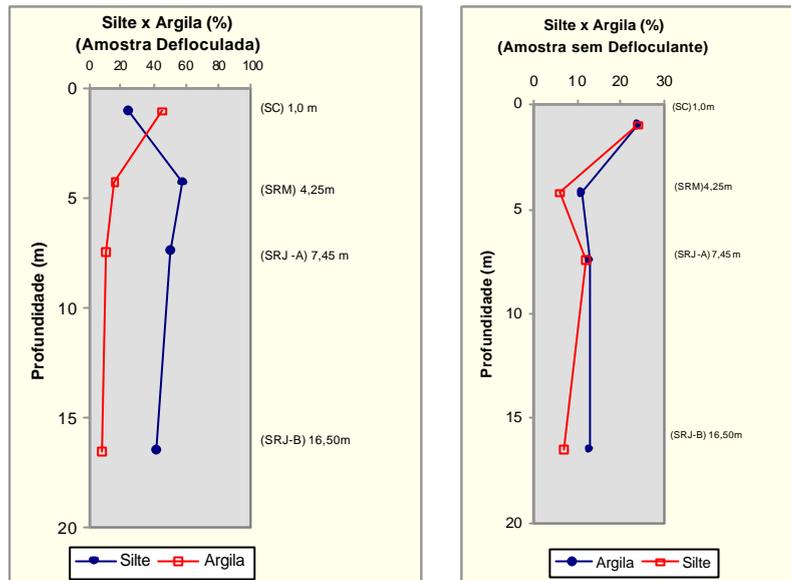


Figura 5.4 – Variação das Frações Silte e Argila por sedimentação

Analisando-se os resultados acima, observa-se no gráfico, que existe uma variação entre esses solos com a profundidade, onde se verifica um comportamento inverso entre as frações argila e silte, devido a decréscimo da fração mais fina.

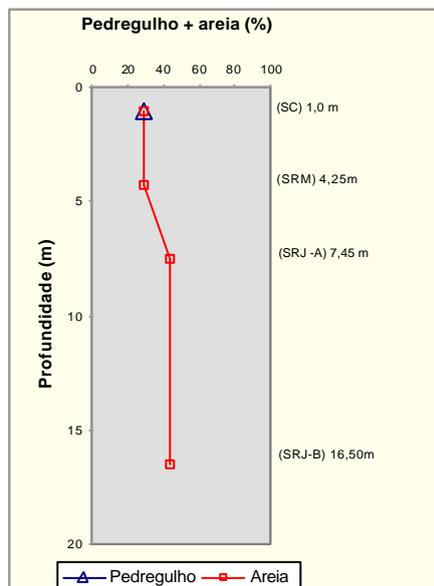


Figura 5.5 – Variação das Frações Pedregulho + Areia

Na análise granulométrica da fração pedregulho mais areia (Figura 5.5), nota-se que a primeira aparece uma única vez em número reduzido na camada referente ao solo coluvionar estudado, o que não ocorre com a fração granulométrica referente a areia, a qual atribui-se um crescimento gradual e proporcional ao longo da profundidade do solo estudado.

5.3.2.2. Limite de Atterberg

A plasticidade é normalmente definida como uma propriedade dos solos, que consiste em uma maior ou menor capacidade de serem eles moldados, sob certas condições de umidade.

Gidigaw (1976), cita como influente na plasticidade dos solos, os seguintes fatores:

- **natureza dos Minerais** – Os argilominerais em formato lamelar ou em placas são aqueles que apresentam maior plasticidade ao contrário dos demais minerais;
- **porcentagem de Fração Argila** – O aumento do grau de plasticidade de um solo está relacionado diretamente a uma maior quantidade de argila presente;
- **natureza dos Cátions Trocáveis** – Os minerais com alta plasticidade como os minerais do grupo da esmectita, estão sujeitos a uma maior influência com o tipo de cátion adsorvido do que minerais que apresentam baixa plasticidade, como por exemplo, a caulinita;
- **quantidade de Matéria Orgânica** – O conteúdo de matéria orgânica altera os limites de plasticidade, sem, contudo, influenciar no índice de plasticidade.

Valores de limite de consistência mais comuns para alguns argilominerais, são apresentados por Mitchell (1993), conforme a Tabela 5.3.

Tabela 5.3 – Limites de Atterberg para argilominerais (modificado por Mitchell, 1993)

Mineral	w _l (%)	w _p (%)
Montmorilonita	100-900	50-100
Ilita	60-120	25-60
Caulinita	30-110	25-40

O autor correlaciona os valores apresentados na tabela acima aos seguintes fatores:

- para cada argilomineral a variação nos limites de liquidez é maior do que a variação ao limite de plasticidade;
- a variação no limite de liquidez entre diferentes argilominerais é muito maior do que a variação nos limites de plasticidade.

Os gráficos da Figura 5.6 representam a variação dos limites de Atterberg com a profundidade onde foram extraídas as amostras para ensaios de um modo geral.

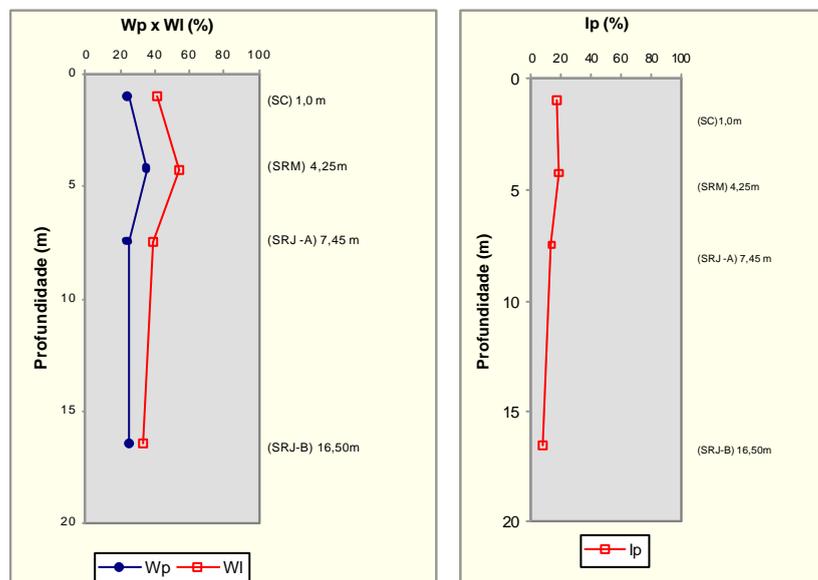


Figura 5.6 - Variação dos Limites de Atterberg

Observando-se as curvas dos gráficos acima, pode-se dizer que a maior variação entre eles é devido ao limite de liquidez, confirmando, portanto estudos realizados por Mitchell (1993).

Verifica-se também que a partir dos 4,25 metros de profundidade, ocorre uma evidente mudança no comportamento do horizonte desses solos, devido ao decréscimo do índice de plasticidade que sinaliza a passagem de um horizonte de solo com maior teor de argila para um subjacente menos argiloso.

5.3.2.3. Umidade Natural e Umidade Higroscópica

Os teores de umidade natural foram obtidos de duas formas, a saber:

- a partir das amostras indeformadas retiradas da parede direita, norte do talude pertencente à Erosão 1.
- da extração de amostras amolgadas do ensaio penetrométrico (SPT) referente ao Piezômetro PZ-46, junto à mesma erosão, cujas umidades são apresentadas no perfil de sondagem SPT do furo (em anexo).

Os teores de Umidade Higroscópica foram determinados após secagem ao ar das amostras numa temperatura ambiente de 25⁰C, para uma umidade relativa do ar de aproximadamente 75%. Estando as variações entre os teores de umidades obtidos, em função da profundidade, representados na Figura 5.7.

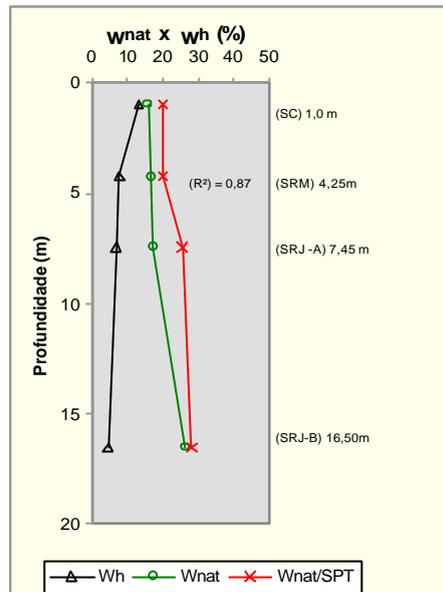


Figura 5.7 – Variação dos teores de Umidade Natural (W_{nat}) e Umidade Higroscópica (W_h)

Analisando-se o gráfico acima, observa-se uma variação crescente entre as duas curvas representativas das umidades naturais em função da profundidade local. Isto pode ser atribuído à proximidade com o lençol freático, encontrado a partir dos 17 metros, no interior da erosão estudada.

Quanto à curva representativa do teor de umidade higroscópica se comparada as duas outras curvas presentes, nota-se um decréscimo com a profundidade o que é perfeitamente aceitável, pelas características apresentadas pela camada de solo analisada em função da sua fração granulométrica crescente para areia e silte, sendo decrescente para argila, em função da profundidade estudada.

Isto indica que os solos de camadas mais profundas apresentam uma maior susceptibilidade à perda da capacidade de retenção do teor de umidade, em relação às camadas de solos mais próximas da superfície.

5.3.2.4. Peso Específico

A Figura 5.8 representa a variação do peso específico seco (γ_d) com o peso específico dos sólidos (γ_s) e o peso específico natural (γ_{nat}) em relação à profundidade de onde foram extraídas as amostras de solo, como pode ser observada a seguir.

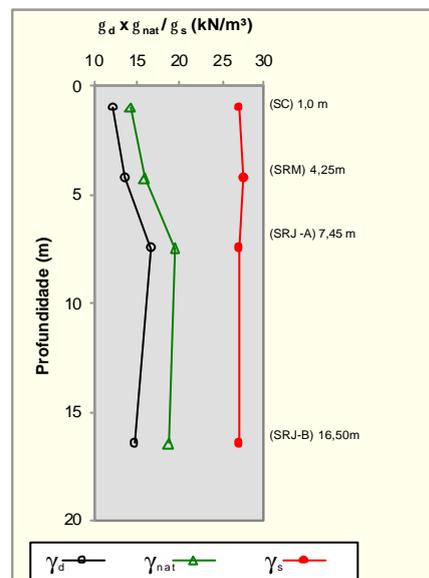


Figura 5.8 – Variação do Peso específico aparente seco (γ_d) com o peso específico natural (γ_{nat}) e o Peso específico dos sólidos (γ_s)

Analisando-se o gráfico acima, observa-se uma correlação crescente até a profundidade de 7,45 metros, para as curvas representativas do peso específico seco (γ_d) e do peso específico natural (γ_{nat}) com valores entre 12,17 kN/m³ a 16,66 kN/m³ e 14,13 kN/m³ a 19,53 kN/m³, respectivamente. A partir da profundidade de 7,45 metros essas curvas apresentam um ligeiro decréscimo até a profundidade estudada, com valores de 16,66 kN/m³ a 14,8 kN/m³ e 19,53 kN/m³ a 18,72 kN/m³, respectivamente.

O aumento e decréscimo desses pesos específicos, representados por suas curvas a partir das profundidades estabelecidas no gráfico, podem ser

atribuídos à presença de alguns argilominerais em escala crescente como: grupos da esmectita, da caulinita e illita, que poderiam levar a um aumento do peso específico aparente seco (γ_d) e do Peso Específico dos Grãos (γ_s), este último representando a média da massa específica dos constituintes da fase sólida de um solo, incluindo os seus minerais, sais precipitados, compostos orgânicos e materiais não cristalinos.

O valor da densidade relativa dos grãos de um solo depende do constituinte mineralógico da partícula, sendo que para a maioria destes, seu valor varia entre 2,60 e 2,85, diminuindo para os solos que contém elevado teor de matéria orgânica e aumentando para solos ricos em óxidos de ferro.

Dessa forma, tendo a densidade relativa o mesmo valor que a massa específica de um solo, porém adimensional pode-se correlacionar seus valores, com os apresentados na Tabela 5.4, referente a alguns minerais presentes no solo.

Tabela 5.4 – Massa Específica dos Minerais Identificados (modificado – Deer et al, 1981)

Mineral	$r(\text{g/cm}^3)$	Mineral	$r(\text{g/cm}^3)$
Quartzo	2,65	Gibbsita	2,4
Muscovita	2,7 – 3,1	Goethita	4,3
Caulinita	2,61 – 2,68	Hematita	5,2
Illita	2,60 – 2,86	Maghemita	4,23 – 5,5
Montmorillonita	2,75 – 2,78	Rutito	4,23 – 5,5

5.3.2.5. Índice de Vazios, Porosidade e Grau de Saturação

Uma das formas de se correlacionar esses índices físicos pode ser com a profundidade dos horizontes representativos dos solos estudados. Dessa forma, os gráficos da Figura 5.9 mostram uma variação dos índices de vazios, porosidade e do grau de saturação com a profundidade.

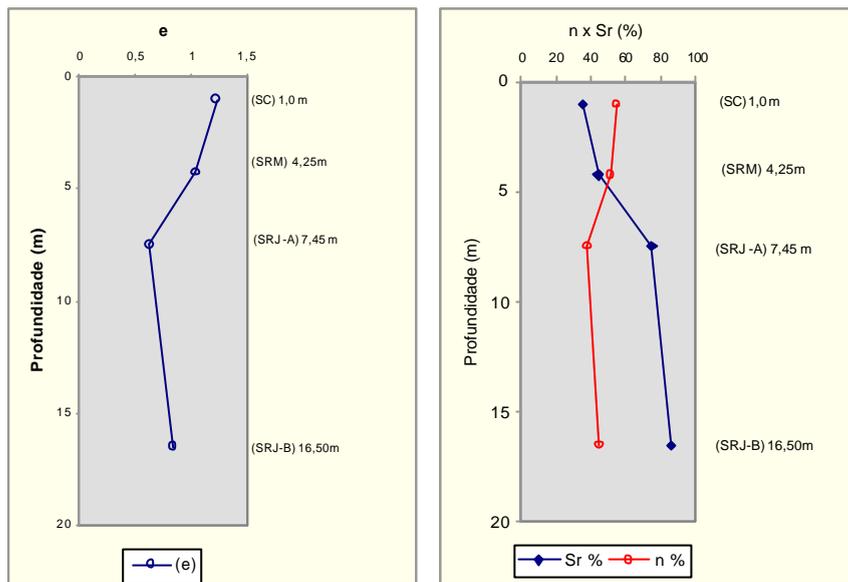


Figura 5.9 - Variação do Índice de Vazios (e), Porosidade (n) e do Grau de Saturação (S)

A análise dos gráficos acima mostra valores altos para índices de vazios e porosidades próximas à superfície, com tendência a diminuir à medida que os horizontes desses solos se tornam mais resistentes com a profundidade, portanto menos susceptíveis a processos erosivos.

Segundo Gidigasu (1976), processos de lixiviação conduzem a um aumento da porosidade dos solos o que pode explicar em parte os altos valores dos índices de vazios nos horizontes superficiais. Sendo que nos horizontes concrecionários, onde ocorre uma maior densificação física dos componentes desses solos, o índice de vazio tende a diminuir. Um outro fator que pode ser correlacionado ao aumento do índice de vazios é a presença da atividade biológica de plantas e animais na estrutura do solo.

Quanto ao grau de saturação até a profundidade de 7,45 metros, observa-se uma correlação inversa quando comparado aos outros dois índices físicos. Isto ocorre devido a uma maior proximidade das camadas dos solos inferiores com o lençol freático, com surgência média, nos períodos secos, a partir dos 15 metros de profundidade da erosão estudada.

5.3.2.6. Índice de Atividade

Independente do tipo e da quantidade dos argilominerais presentes no solo, os limites de Atterberg refletem a influência destes nas propriedades do solo. Mitchell (1993) descreve que para separar a influência destes dois fatores, Skempton (1953) propôs o termo índice de atividade que é definido como sendo a razão entre o índice de plasticidade e o tamanho da fração argila menor que 2μ , $I_a = I_p / (\%)2\mu$. Sendo que quanto maior a atividade, maior será a influência da fração argila nas propriedades do solo.

A Figura 5.10 mostra que os resultados obtidos a partir das amostras de solos ensaiadas, revelam que as argilas estudadas apresentam-se no solo coluvionar como inativas ($I_a < 0,75$), já as amostras pertencentes aos solos residuais maduros e residual Jovem A, apresentam as frações argilas com atividade normal ($0,75 < I_a < 1,25$) e a amostra do solo residual Jovem B apresenta essa fração como ativa ($I_a > 1,25$).

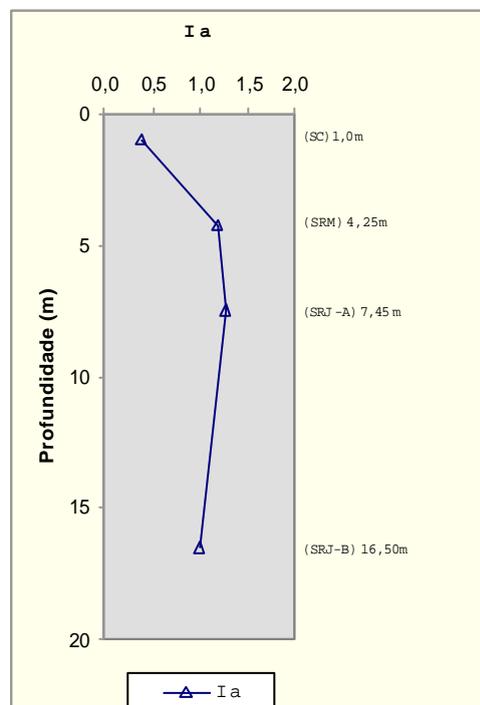


Figura 5.10 – Variação do Índice de Atividade

5.3.3. Correlação entre as propriedades físicas

Como já descrito, somente, a distribuição granulométrica não caracteriza o comportamento dos solos sob o ponto de vista da Engenharia, pois a fração fina destes têm uma importância fundamental nesta etapa.

Uma forma de se estabelecer uma correlação dos resultados obtidos através dos ensaios de caracterização é pela propriedade de consistência (Limites de Atterberg) com as principais propriedades físicas do solo estudado, as quais passam a serem representadas em forma de gráficos, cujo resumo dos resultados constam na Tabela 5.1.

Para elaboração desses gráficos, utilizou-se apenas os resultados representativos das amostras dos horizontes de solos pertencentes a Erosão 1, classificados como solo Coluvionar, solo Residual Maduro e solos Residuais Jovem-A e Jovem-B, onde as características inerentes a cada substrato geológico são melhor preservadas.

Analisando-se os resultados da umidade higroscópica (w_h) em função das propriedades de consistência (w_l , w_p e I_p), para os solos pertencentes à erosão estudada, nota-se uma correlação linear crescente entre o Índice de Plasticidade (I_p) e o teor de umidade higroscópica (w_h), reflexo da própria constituição mineralógica da fração de solo (argila e silte), provavelmente rica em quartzo, não favorecendo a retenção de água nos seus interstícios (Figuras 5.11 e 5.12).

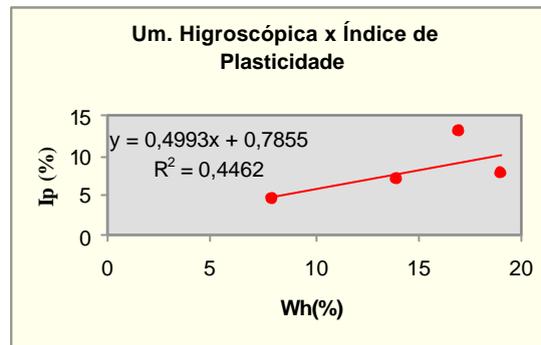


Figura 5.11 – Análise da unidade higroscópica (W_h) em função do Índice de Plasticidade (I_p)

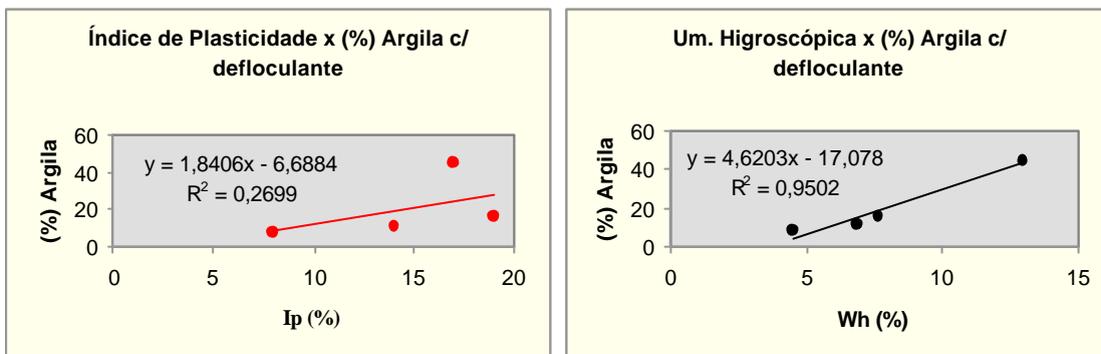


Figura 5.12 – Índice de Plasticidade, Umidade higroscópica versus o percentual de argila.

Com relação aos gráficos acima, observa-se uma tendência linear crescente da umidade higroscópica e do Índice de plasticidade, com os solos mais próximos à superfície. Devendo-se justificar essa ocorrência pelo aumento gradativo da fração argila nesses solos.

Outra forma de se correlacionar esses índices é através da influência do percentual de silte mais argila, ambos obtidos a partir do ensaio granulométrico, conforme representações gráficas constantes da Figura 5.13.

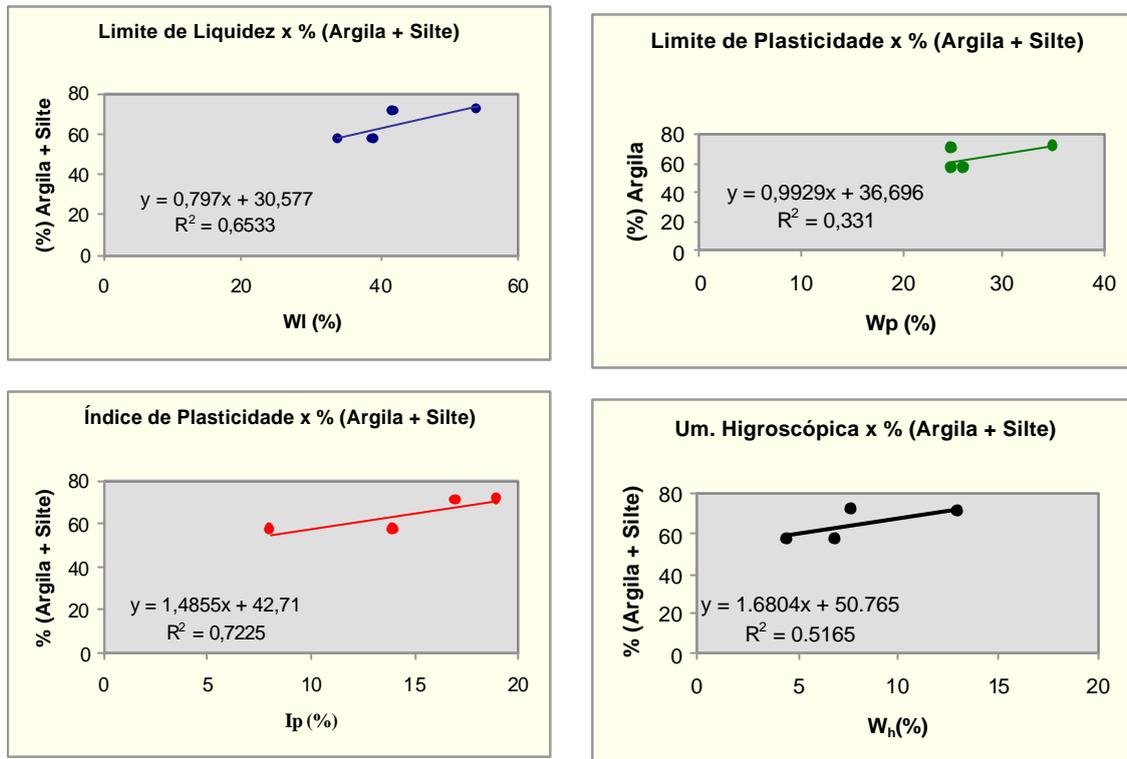


Figura 5.13 – limite de Atterberg e Umidade higroscópica versus Porcentual de argila e silte

Analisando-se os gráficos acima, constata-se que o coeficiente de correlação entre a soma dos percentuais de argila e silte com os limites de consistência e a umidade higroscópica, apresentam uma melhor correlação entre os índices físicos estudados.

Convém ressaltar que, a porcentagem de argila só ocorre em maior escala no solo coluvionar, decrescendo de forma inversa, quando comparada às frações de silte e areia que apresentam um aumento dos seus valores percentuais, com a profundidade.

Os resultados das análises laboratoriais relativas as principais propriedades físicas do solo estudado junto às observações de campo, levam a concluir que as características de correlação representadas pelos índices físicos dos horizontes intermediários pertencentes ao solo Residual Maduro e

Residual Jovem-A mostram uma tendência definida de comportamento a ocorrência de processos erosivos na presença de água, devido principalmente aos altos índices de vazios, porosidades e Limites de Liquidez apresentados, fenômenos esses que facilitam a percolação de fluxo d'água.

Para o solo Coluvionar, esta tendência não se aplica, apesar deste possuir índice de vazios elevado, provavelmente devido a argilominerais presentes na fração argila deste solo. Já para o solo Residual Jovem B, esse se torna mais concrecionário, à medida que seus horizontes se aprofundam, o que pode ser confirmado pela observação de campo e correlação entre os resultados dos índices físicos apresentados, que indicam uma diminuição dos índices de vazios e da plasticidade desse solo e um aumento das frações de areia silte com a profundidade, ocorrendo um decréscimo da fração argila, classificada como de atividade normal, o que pode ser considerado como uma porção cimentante para os agregados componentes deste solo, tornando-o dessa forma, mais estruturado, porém isso não é um condicionante para que se possa afirmar ser este solo menos susceptível a sofrer processos erosivos, pois se verifica que os solos com maior concentração da fração de silte em sua estrutura são os mais susceptíveis a sofrerem erosões, para o caso estudado destaca-se o solo Residual Maduro e o Solo Residual Jovem A.

Com referência ao potencial de perda de solo pelas camadas analisadas, torna-se difícil um estabelecimento direto entre as propriedades físicas estudadas com a susceptibilidade a processos erosivos, já que as características geotécnicas do solo não são capazes isoladamente de identificar o seu potencial de erodibilidade, necessitando, portanto a sua comprovação, de uma complementação através dos ensaios específicos de erodibilidade e de alguns ensaios especiais os quais serão apresentados nos capítulos a seguir.

5.4. Ensaio de Erodibilidade

De acordo com a revisão bibliográfica, Fácio (1991), concluiu que o uso de correlações entre a erodibilidade dos solos e suas características físico-químicas e geotécnicas, ficam comprometidas pelo elevado número de parâmetros que interferem nesse processo, necessitando, portanto, de uma análise sob as condições específicas de cada uma destas para a formulação de um modelo universal.

Foram realizados os ensaios *Crumb Test*, de Desagregação, *Pinhole Test* e *Inderbitzen*, que passam a serem descritos, de forma a terem seus resultados obtidos comparados com as observações feitas em campo, a fim de aferir o grau de compatibilidade entre si. Os ensaios acima foram realizados no Laboratório de Solos, da empresa Furnas Centrais Elétricas S.A.

5.4.1. *Crumb Test*

Este ensaio originalmente proposto por Rallings (1966), e modificado por Sherard et al (1976), proporciona uma forma muito simples de identificação de solos argilosos dispersivos sem a necessidade de requerer um equipamento especial, partindo-se da premissa que argilas dispersivas⁵ possuem preponderância de cátions de sódio dissolvidos na água intersticial, enquanto que as argilas resistentes à dispersão possuem comumente cátions de cálcio e magnésio.

- **Metodologia**

Para o ensaio utilizou-se uma solução de hidróxido de sódio (NaOH), na concentração de 1 mili-equivalente por litro de solução (isto é 0,01 normal), ou

⁵ Dispersibilidade – susceptibilidade ao fenômeno do efeito de retroerosão progressiva, ou seja, propriedades que apresentam certos solos argilosos de permitirem que suas partículas sejam desagregadas quando em presença de água.

seja, para 1 litro de solução, foram dissolvidos 0,04 grama de hidróxido de sódio anidro em um becker com capacidade para 1000 ml. Após essa fase, foram colocadas no becker, amostras dos solos estudados na umidade natural e em forma de torrões, com diâmetro efetivo entre 6 e 10 mm, durante um intervalo de tempo variando entre 5 e 10 min. Após a observação das reações das amostras, verifica-se o resultado obtido de acordo com a interpretação proposta por Sherard *et al.* (1976), conforme tabela a seguir.

Tabela 5.5 – Guia de interpretação proposta por Sherard et al (1976)

GRAU 1	Nenhuma reação	Os fragmentos poderão se desmanchar, espalhando-se suavemente pelo fundo do becker, sem, no entanto apresentar sinal de turbidez, causada por partículas coloidais, na suspensão.
GRAU 2	Reação Fraca	Turbidez incipiente ou inexpressiva na solução, na superfície dos fragmentos. Se a turbidez for facilmente visível considerar como GRAU 3.
GRAU 3	Reação Moderada	Nuvem de colóides ⁶ (turbidez) facilmente reconhecível na suspensão, normalmente espalhando-se em camadas tênues pelo fundo do Becker.
GRAU 4	Reação Forte	A nuvem de colóides cobre quase todo o fundo do becker, normalmente como uma fina película. Em casos extremos toda a solução do copo se torna turva.

Segundo Sherard et al, 1976, os resultados verificados como grau 1 e 2, podem ser interpretados como solos de nenhuma ou fraca reação, respectivamente, portanto como não dispersivos, e para os solos com grau 3 e 4 como de reação moderada a forte, respectivamente, portanto consideradas como dispersivos.

Outra maneira de se aferir o comportamento quanto a dispersibilidade de uma determinada amostra de solo, é com a utilização de água destilada, que se apresenta como um inibidor tão bom quanto a solução de Hidróxido de Sódio (NaOH). Ressalta-se, no entanto, que muitas argilas dispersivas não apresentam reação em água destilada, mas reagem na presença da solução.

⁶ Colóides – denotação, muitas vezes utilizada, da fração argila dos solos, constituída por um ou mais argilominerais, sílica coloidal, cristais de quartzo com diâmetro inferior a 0,002mm, microgrãos de óxidos de ferro hidratado ou não, e matéria orgânica.

- **Análise dos Resultados**

Para o ensaio, foram analisadas amostras de solos coletados na campanha de campo da UHE de Itumbiara com os horizontes recebendo as seguintes denominações: Solo Coluvionar (SC), Solo Residual Maduro (SRM), Solo Residual Jovem A (SRJA) e Solo Residual Jovem B (SRJ-B), cujos resultados são os apresentados a seguir e têm como base de interpretação a classificação proposta por Sherard et al, 1976 (Tabela 5.5).

Quanto à interpretação dos resultados do ensaio Crumb Test, com a solução de hidróxido de sódio (NaOH) no becker da esquerda e de água destilada no becker de direita, constam da relação e fotos apresentadas na Tabela 5.7 e discutidas a seguir:

Tabela 5.6 - Resultado do ensaio Crumb Test

Identificação da Amostra	Resultado	Fotos		
		Amostra de solo	Antes	Depois
			NaOH	H ₂ O
SC	Grau 1			
SRM	Grau 2			
SRJ-A	Grau 3			
SRJB	Grau 3			

Os resultados apresentados na Tabela 5.6 do ensaio de Crumb Test definem o Solo Coluvionar como sendo de Grau 1, portanto não apresentando nenhuma reação a dispersibilidade. Quanto ao Solo Residual Maduro este foi

classificado como sendo de Grau 2, portanto apresentando fraca reação a dispersibilidade.

Já o solo Residual Jovem A e B, apresentam classificação como sendo de Grau 3, portanto de reação moderada a dispersibilidade.

Outra forma de se correlacionar o grau de dispersão desses solos, medido em forma de valores porcentuais, é através da equação proposta por Volk (1937) apud Sherard et al (1976), para solos argilosos submetidos ao ensaio de dispersibilidade, classificado como ensaio sedimentométrico comparativo (SCS – NBR 13602/1996), cujos resultados constam da Tabela 5.6, obtidos do gráfico da Figura 5.12, que visa verificar a facilidade com que solos naturais se dispersam sem agitação mecânica e identificar qual a possibilidade do solo analisado apresentar uma maior ou menor tendência de se dispersarem, cuja fórmula e classificação são apresentadas a seguir:

$$P_d (\%) = \frac{(\%) \text{ de partículas } < 5\mu_m, \text{ sem dispersante}}{(\%) \text{ de partículas } < 5\mu_m, \text{ com dispersante}} \quad (2)$$

Valor em porcentual, atribuído a dispersão de solos argilosos, que serão classificados de acordo como seguinte critério:

Classificação da dispersibilidade:	Média $\text{D } 20\% < P_d < 25\%$
	Alta $\text{D } 25\% < P_d < 50\%$
	Muito Alta $\text{D } P_d > 50\%$

O ensaio sedimentométrico comparativo é aplicável apenas a solos que contenham mais de 12% da fração argila das partículas com diâmetro inferior a 0,005mm, quando ensaiadas pelos critérios da NBR 7181/1984. Se Diferenciado destes, somente pela não utilização de agitação mecânica e o não adicionamento de agentes dispersantes na solução solo-água.

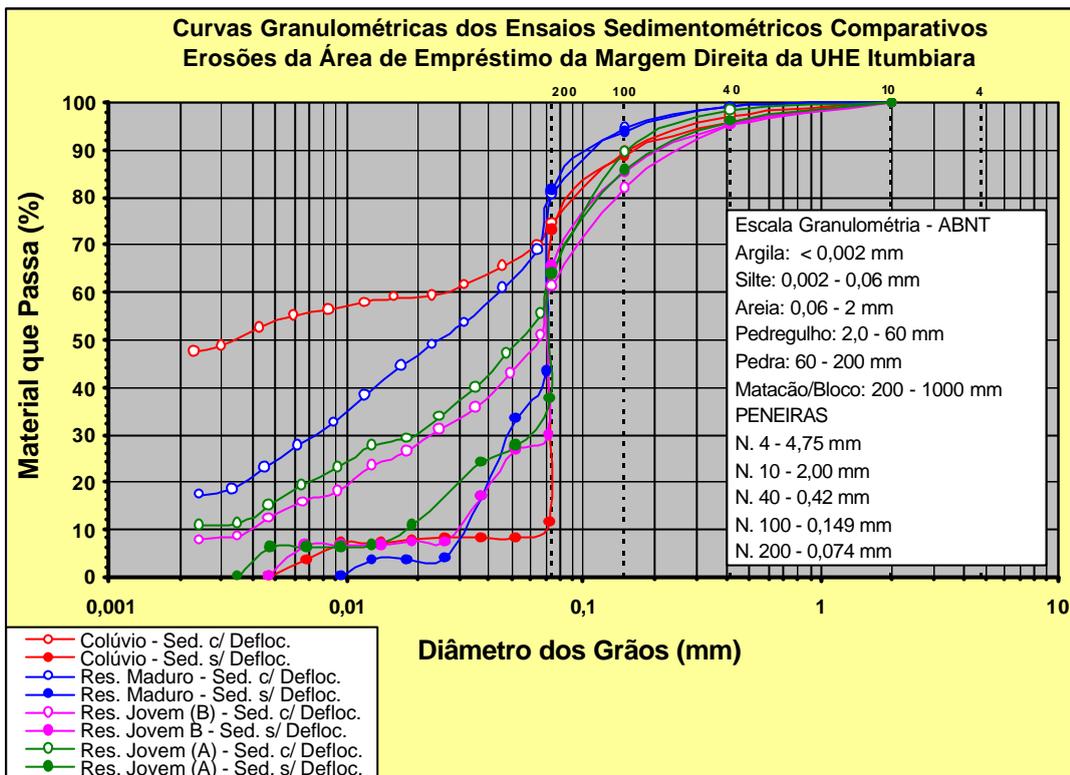


Figura 5.14 - Curvas representativas do Ensaio Sedimentométrico Comparativo

Tabela 5.7 – Resumo dos resultados do ensaio sedimentométrico comparativo (0,002 – 0,05mm)

AMOSTRA		SC	SRM	SRJ-A	SRJ-B	
FRAÇÃO	SILTE (%)	-	17	45	38	36
	(SCS)*		8	32	28	26
	ARGILA (%)	-	47	17	11	8

(SCS)* – sem defloculante

Fazendo-se uma correlação deste ensaio com o percentual de dispersão proposto pela equação (2), obteve-se para os dados analisados o seguinte grau de classificação quanto a dispersibilidade:

Solo Residual Jovem A $\hat{P} P_d = 33\%$ (dispersibilidade alta);

Demais solos $\hat{P} P_d = 0\%$ (não dispersivos).

Em se tratando de solo não argiloso, uma outra proposta de correlacionar a equação (2) é apresentada pelo autor com a utilização do somatório de finos

(argila + silte), o que classifica os solos estudados em relação a dispersibilidade, com:

Solo Residual Maduro e Jovem A $P_d = 52$ e 57% respectivamente,
(dispersibilidade muito alta);

Solo Coluvionar e Residual Jovem B $P_d = 13$ e 18% , respectivamente,
(dispersibilidade baixa).

Comparando-se os resultados apresentados pela equação (2) com os obtidos pelo Ensaio de Crumb Test, pode-se dizer que não há uma correlação aceitável entre os dois métodos quanto ao grau de dispersibilidade desses solos. Isto pode ser explicado pelos resultados do ensaio sedimentométrico comparativo, que indica para o solo estudado como sendo de textura siltosa, Tabela 5.7, e não argilosa como proposto pela equação (2). Podendo ser melhor definida as condições de dispersibilidade desses solos, quando da utilização do somatório de finos, argila+ silte, proposto pelo autor.

5.4.2. Desagregação

A erodibilidade de um solo pode também ser analisada, a partir de observações sobre o comportamento de amostras desses em contato com a água.

De acordo com Fonseca (1981), o ensaio de erodibilidade “é executado com o objetivo de se observar o comportamento relativo de uma amostra de solo sob influência da água”.

O mesmo autor descreve que estudos realizados em áreas de testes do Instituto de Pesquisas Rodoviárias verificaram que a velocidade de desagregação era proporcional a erodibilidade dos horizontes de um solo de gnaíse, submetido ao mesmo ensaio.

Santos (1997) realizou no laboratório de Furnas -GO ensaio com amostras de solos cúbicas, com 6cm de lado, onde foram colocadas primeiramente sobre uma pedra porosa com o nível d'água sendo mantido na altura da base da amostra por um período de 30 minutos. A seguir, a altura d'água foi aumentada sucessivamente para 1/3, 2/3, até a submersão total das amostras, mantendo-se entre cada uma destas fases um intervalo de 15 minutos. Após a submersão total, o ensaio prosseguiu por um período de 24 horas.

- **Metodologia**

A metodologia adotada objetiva a observação do comportamento de amostras de solos sob a influência d'água. Para tanto, foram utilizadas amostras indeformadas obtidas a partir dos blocos retirados da parede direita do talude da Erosão 1, caso estudado, os quais receberam as seguintes denominações: Solo Coluvionar (SC), Solo Residual Maduro (SRM), Solo Residual Jovem-A (SRJ-A) e Solo Residual Jovem -B (SRJ-B).

Para a realização dos ensaios de desagregação os corpos de provas, foram moldados com 5 cm de lado e colocados dentro de duas bandejas com água, observando-se em seguida as suas reações ao processo de submersão.

Na primeira bandeja (Figura 5.15), as amostras foram colocadas primeiramente sobre uma pedra porosa com o nível d'água sendo mantido na altura da base das amostras por um período de 30 minutos.

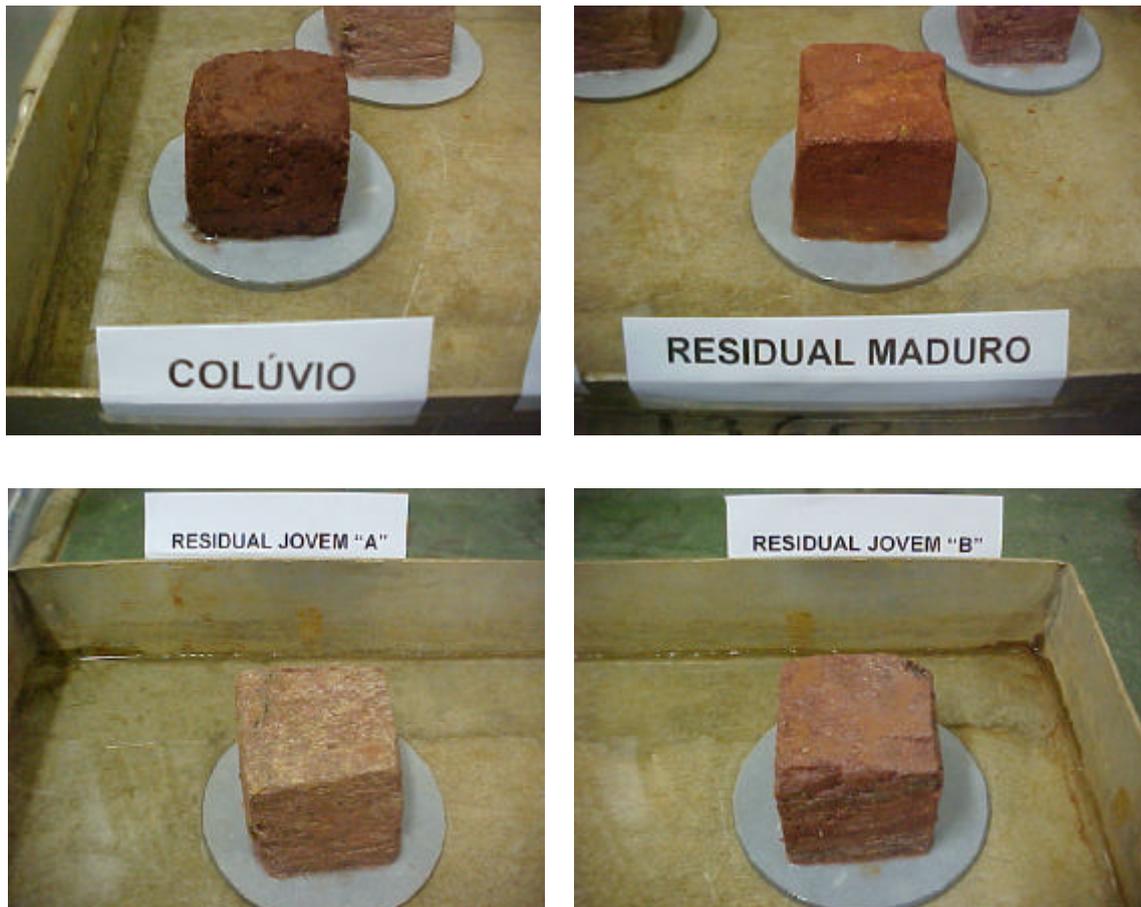


Figura 5.15 – Amostras colocadas sobre Pedra Porosa, Ensaio de Imersão Progressiva (até a base – 30 min)

A seguir a altura da água foi sucessivamente aumentada a cada 15 minutos, até atingir 1/3 da altura total da amostra, no tempo de 45 minutos (Figura 5.16).



Figura 5.16 – Amostras colocadas sobre Pedra Porosa, Ensaio de Imersão Progressiva (até a 1/3 H – 45 min)

Logo em seguida, a amostra foi imersa até 2/3 de sua altura total, permanecendo a mesma nesta condição até o tempo de 60 minutos.



Figura 5.17 – Amostras colocadas sobre Pedra Porosa, Ensaio de Imersão Progressiva (até a 2/3 H – 60 min)

Após as etapas iniciais, descritas anteriormente, prosseguiu-se com o ensaio submetendo as amostras à imersão total por um período de 24 horas.



Figura 5.18 – Amostras colocadas sobre Pedra Porosa, Ensaio de Imersão Total (período de 24 horas)

Os corpos de prova foram submetidos à imersão total desde o início do ensaio prosseguindo sob esta condição por um período de 24 horas, obedecendo-se as seguintes etapas a seguir:

a) Logo após a inundação



Figura 5.19 – Amostras colocadas sobre Pedra Porosa, Ensaio de Imersão Total (logo após a inundação)

b) Após 15 minutos decorridos to tempo de inundação



Figura 5.20 – Amostras colocadas sobre Pedra Porosa, Ensaio de Imersão Total (após 15 min)

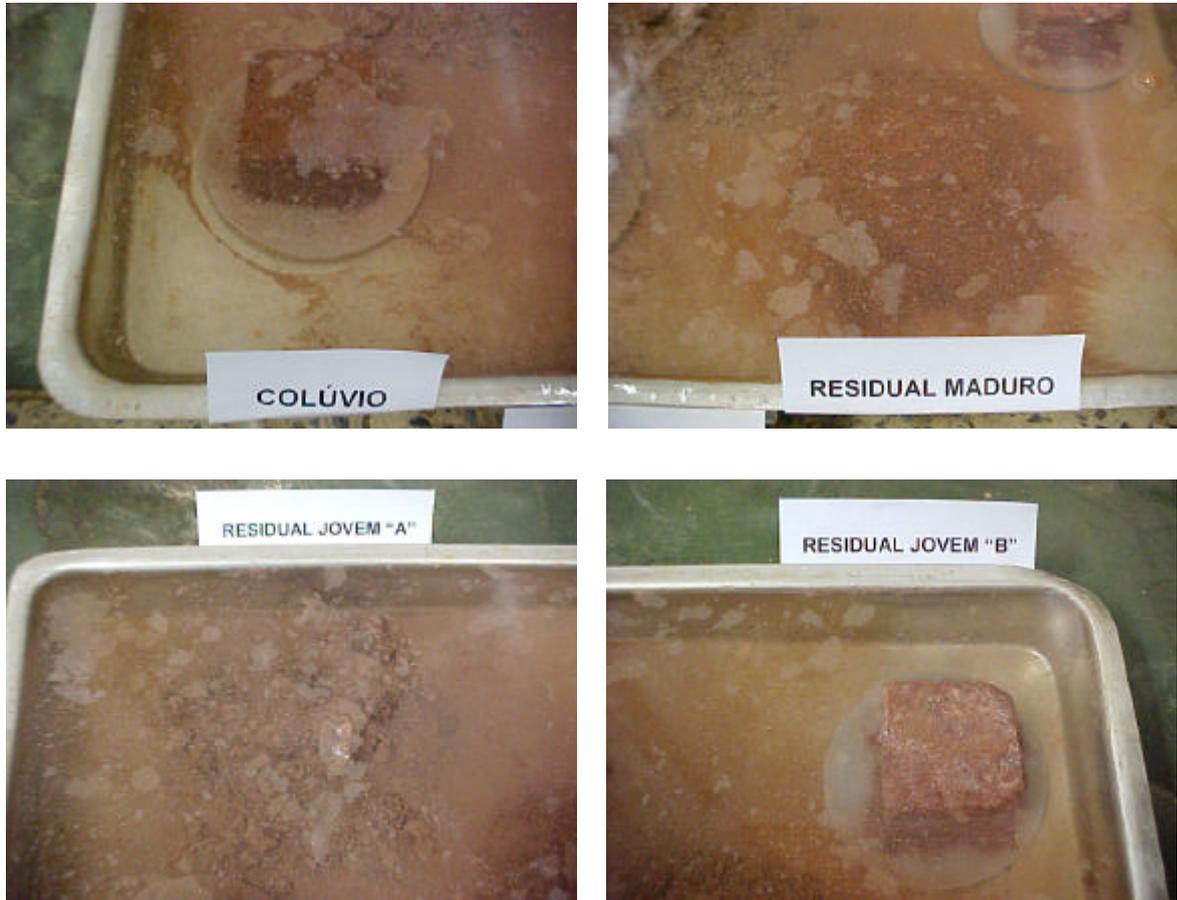
c) Ao término do período de 24h da inundação

Figura 5.21 – Amostras colocadas sobre Pedra Porosa, Ensaio de Imersão Total (após 24 h)

- **Análise dos Resultados**

De uma forma geral, pode-se verificar que as amostras de Solo Coluvionar (SC), não apresentam alterações na sua forma em nenhum estágio dos ensaios realizados. Quanto às amostras de Solo Residual Jovem B (SRJ-B) apresentam apenas uma pequena desagregação em sua base, após esta ter sido totalmente submetida ao processo de inundação.

As amostras de Solo Residual Maduro (SRM) e Residual Jovem-A (SRJ-A) apresentam um processo de desagregação muito intenso.

No ensaio realizado com imersão progressiva (Figuras 5.15 a 5.18) o processo de desagregação ocorreu da seguinte forma:

- água até a base da amostra (após 30 minutos do início do ensaio): observa-se ascensão capilar nas amostras (Figura 5.15);
- água à 1/3 da altura da amostra (após 45 minutos do início, do ensaio): nota-se uma desagregação intensa do corpo de prova do Solo Residual Maduro (SRM) pelo processo de abatimento. O corpo de prova do Solo Residual Jovem-A (SRJ-A) apresentou o mesmo processo, porém em menor escala (Figura 5.16).
- água à 2/3 da altura da amostra (após 60 minutos do início do ensaio): na amostra de Solo Residual Maduro (SRM) teve continuidade o processo de abatimento. Já na amostra do Solo Residual Jovem-A (SRJ-A) o processo de abatimento ocorreu em menor escala, acompanhado por início de fraturamentos, onde a amostra se quebra em fragmentos seguindo direções preferenciais (Figura 5.17).
- água cobrindo toda a amostra (após 24 horas do início do ensaio): a amostra do Solo Residual Maduro (SRM) apresentou desagregação total pelo processo de abatimento. Já a amostra do Solo Residual Jovem-A (SRJ-A) apresentou desagregação quase total, sendo que a passagem do estágio anterior para este ocorreu fraturamentos (Figura 5.18).

No ensaio realizado com imersão total (Figuras 5.19 a 5.21) dos corpos de prova no tempo zero, o Solo Residual Maduro (SRM) apresentou desagregação total logo após a imersão, por meio do processo de abatimento. É importante salientar que à medida que a amostra foi sendo inundada, esta sofreu um intenso processo de desagregação, a ponto de poder ser comparada a uma pastilha de “sonrisal”.

Já a amostra do Solo Residual Jovem-A (SRJ-A) apresentou na fase final do ensaio um processo de desagregação quase que total, sendo esta precedida por fraturamentos.

Os resultados ora apresentados fornecem uma boa correspondência com as ocorrências evidenciadas no campo que confirma, com destaque para o Solo Residual Maduro (SRM), ser este o mais susceptível a sofrer processos erosivos, se comparado às demais gêneses submetidas ao mesmo tipo de ensaio.

Este ensaio apesar de sua simplicidade apresenta resultados bastante coerente com os obtidos principalmente nos ensaios de Inderbitzen e Pinhole Test (com amostras indeformadas), que vêm a confirmar mais uma vez uma boa correlação com as observações de campo.

5.4.3. Ensaio *Pinhole Test* (Furo de Agulha)

Este ensaio, idealizado por Sherard et al (1976) tem como objetivo identificar e compreender o comportamento de solos argilosos quanto a sofrerem ou não processos de dispersão, após serem submetidos a carregamentos hidráulicos, pré-estabelecidos.

Uma forma de se observar essa diferença é pelo resultado do ensaio sob carga de 2 polegadas (50mm), que para argilas dispersivas o fluxo emergido da amostra tem coloração visível a uma nuvem coloidal e não clareia com o tempo, sendo que em 10 minutos o furo se alarga para cerca de 3mm, ou mais, e dá-se o ensaio como concluído. Já para argilas não dispersivas o fluxo emergido é completamente limpo, ou se torna limpo em poucos segundos e o furo não erode.

- **Metodologia**

A metodologia deste ensaio foi definida conforme preconiza a NBR 14114/98, como sendo o ensaio de “furo de agulha”, o qual consiste em se fazer percolar água destilada através de um furo de 1mm de diâmetro por 1 polegada (254mm) de comprimento, feito em um corpo de prova cilíndrico de amostra de solo, com diâmetro interno e altura, iguais a 35,7mm e 38,1mm, respectivamente, conforme modelo esquemático do ensaio (Figura 5.20).

O ensaio pode ser realizado, com amostra de solo indeformada e amolgada, sendo a segunda compactada em cinco camadas iguais, com auxílio de pisoteador tipo Harvard (mola calibrada para 6,8kg), aplicando-se um número de golpes necessários para se obter um grau de compactação em torno de 95% em relação ao Proctor Normal (cerca de 16 golpes por camada).

Após moldagem da amostra, crava-se um tronco de cone de metal no centro de uma das faces do corpo de prova, através de pressão exercida pelos dedos, colocando-se em seguida a agulha ao longo do corpo de prova, tendo como guia o tronco de cone. A seguir, prossegue-se com a preparação do material a ser ensaiado, preenchendo-se com cascalho, o espaço entre a base e o topo do corpo de prova com a do cilindro, instalando-se entre esses faceamentos 2 telas de arame, sendo uma na entrada do fluxo e outra na saída.

Por se tratar de solo não saturado e não argiloso, foi introduzido nessa etapa do ensaio, uma fase não prevista na norma, que complementa as etapas anteriores, dando início ao ensaio com a aplicação de uma pressão mínima de saturação sobre a amostra, sem fluxo, deixando-se para isso aberta a saída de ar superior do aparelho de ensaio por um período mínimo de 2 horas, tempo este considerado suficiente para garantir a saturação da amostra ensaiada, evitando-se assim a desestruturação da sua macro-estrutura sob a influência da carga hidráulica inicial. Dessa forma, faz-se percolar água pelo furo sob ação de

cargas hidráulicas de 50, 180, 380 e 1020mm, durante as quais, a vazão é determinada continuamente com auxílio de uma proveta e um cronômetro, devendo a cor da água ser observada na saída do cilindro de percolação e na proveta graduada, destinada a medição dessa.

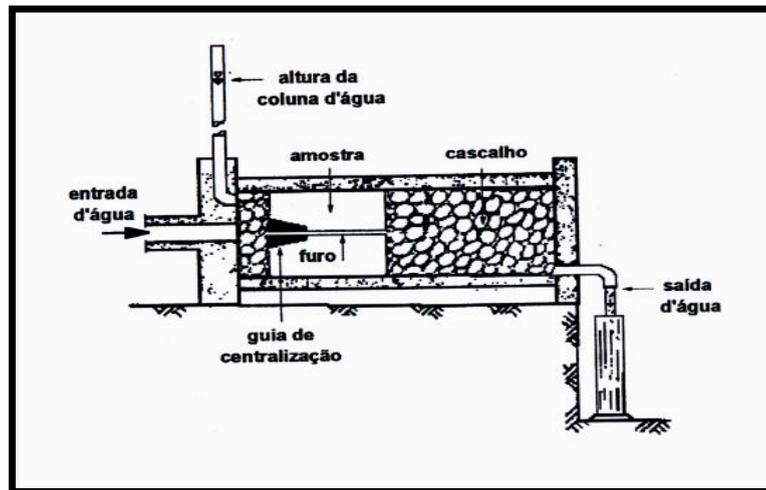


Figura 5.22 – Modelo Esquemático do Ensaio de *Pinhole Test*

A resistência à erosão do solo é estimada pelo diâmetro final do furo, pela coloração da água que sai e pela vazão de percolação medida. É apresentada a seguir uma tabela resumo dos critérios interpretativos desse ensaio, para classificação dos solos quanto ao grau de dispersibilidade.

Tabela 5.8 – Resumo dos critérios interpretativos do Ensaio Pinhole Test (Furo de Agulha)
ASTM· D 4647-(93) adaptado a NBR 14114-98 sob forma de texto

RESUMO DOS CRITÉRIOS INTERPRETATIVOS DO ENSAIO PINHOLE TEST (FURO DE AGULHA)					
Classificação	Carga (mm)	Tempo de Ensaio para uma dada em min.	Vazão do Final de uma etapa em ml/s	Coloração do Fluxo ao Final de uma Etapa	Diâmetro do furo ao final de uma etapa (Ø inicial)
D1	50	5	>1,5	Distinta	(2 x)
D2	50	10	>1,0	De distinta a leve	(2 x)
ND4	50	10	>0,8	Leve, mas facilmente visível.	(1,5 x)
ND3	180-380	5	>2,5	Leve, mas facilmente visível.	(2 x)
ND2	1020	5	>3,5	Clara ou levemente visível	(2 x)
ND1	1020	5	>5,0	Cristalina	Sem alteração visual
D1 – ARGILAS ALTAMENTE DISPERSIVAS D2 – ARGILAS DISPERSIVAS ND4 – MODERADAMENTE DISPERSIVA			ND3 – LEVEMENTE DISPERSIVA ND2 – INCIPIENTEMENTE DISPERSIVA ND1 – NÃO DISPERSIVA		

- **Análise dos Resultados**

Pelas características do solo local, predominantemente constituído de silte arenoso a areno-argiloso, portanto com caracterização física diferenciada da proposta inicial para o ensaio, e visando uma melhor avaliação quanto à susceptibilidade desses solos em se dispersarem, optou-se pela realização de ensaio com amostras de solos amolgadas e indeformadas, cujos resultados passam a ser discutidos.

a) Ensaio com Amostra Amolgada

Solo Coluvionar

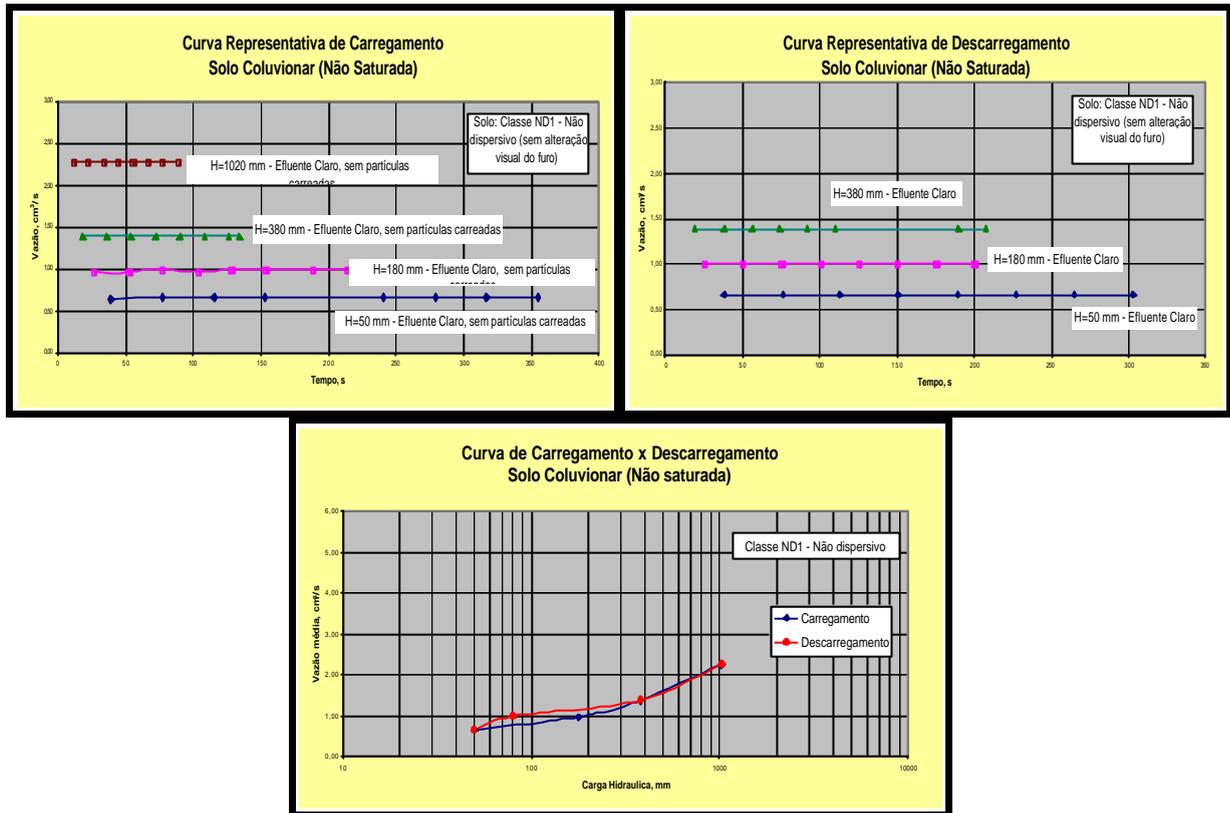


Figura 5.23 – Resultados do Ensaio, tempo e carga hidráulica em função da vazão. (Solo Coluvionar)

Tabela 5.9 – Condições de moldagem do Corpo de Prova para o ensaio (SC)

Condições de Moldagem do corpo de prova	Índice físico inicial	Croqui do corpo de prova
<ul style="list-style-type: none"> Corpo de Prova: compactado, sem secagem prévia. Nº de camadas = 05 Grau de compactação = 95% Altura do corpo de prova = 4cm Diâmetro do corpo de prova = 3,71cm (h-h_{OT}) = 3,3% h_{final} = 23,3% 	<ul style="list-style-type: none"> $\delta r = 2,717 \text{ g/cm}^3$ $h_{OT} = 19,5\%$ $g_{sm\acute{a}x} = 1,674 \text{ g/cm}^3$ $g_s = 1,590 \text{ g/cm}^3$ $h = 23,0\%$ 	
		<p>Classificação quanto a dispersibilidade</p> <p>ND1 (sem alteração visual do furo) Não dispersiva</p>

Analisando-se os dados referentes à Tabela 5.9, verifica-se que o solo ensaiado apresentou as seguintes características de moldagem:

- grau de compactação igual a 95%, em relação ao Proctor Normal;
- umidade ótica $h_{OT} = 19,5\%$ para uma densidade seca dos grãos de $1,674 \text{ g/cm}^3$, ficando os valores para o teor de umidade higroscópica em 11% e para umidade inicial e final em 23%, respectivamente, sendo este último valor próximo ao limite de plasticidade deste solo, que é de 25%.

Nos gráficos da Figura 5.23, tempo e carga hidráulica versus vazão, observa-se que a carga hidráulica inicial de 50mm, atuante sobre a amostra do solo com uma razão de fluxo constante de 25ml/seg, tempo esse em função de cada estágio de carregamento, gerou uma vazão média para o efluente de 0,66 ml/seg, que nos primeiros 5 minutos apresentou coloração completamente clara, sem a presença de partículas carregadas.

Situação esta, mantida até o final da aplicação das cargas de 180mm, 380mm e 1020mm, tendo estas cargas apresentado como vazão média observada os seguintes valores, 0,98 ml/seg, 1,39 ml/seg e 2,27 ml/seg, respectivamente, com tempo total de duração para o ensaio nesta fase de 30 minutos.

Na fase de alívio de carga do ensaio até o retorno à carga inicial (50mm), o tempo de duração foi de 20 minutos, não sendo notado neste período nenhuma anormalidade quanto a vazão, mantendo-se essa nos níveis aceitáveis para cada etapa do ensaio, quais sejam: cargas de 380mm, 180mm e 50mm, com vazões médias de 1,39ml/seg, 1,00ml/seg e 0,66ml/seg, respectivamente.

Após análise e interpretação dos resultados, pode-se classificar o solo como sendo de classe (ND1), sem alteração visível do furo, portanto de

comportamento não dispersivo, conforme interpretação dos valores constantes da Tabela 5.9 e da interpretação da Figura 5.24.

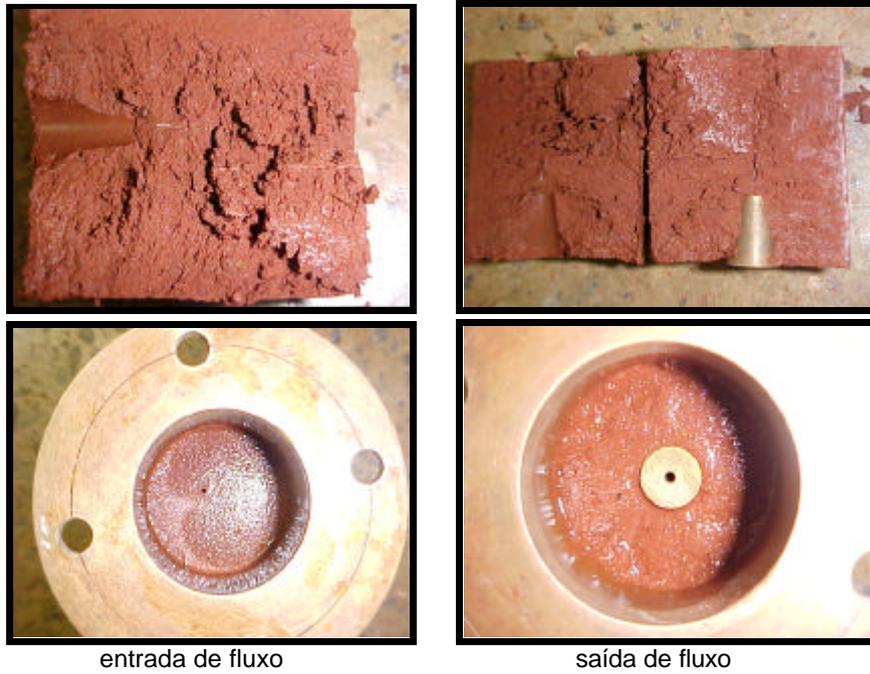


Figura 5.24 – Fotos Representativas da amostra de Solo Coluvionar após o ensaio

Solo Residual Maduro

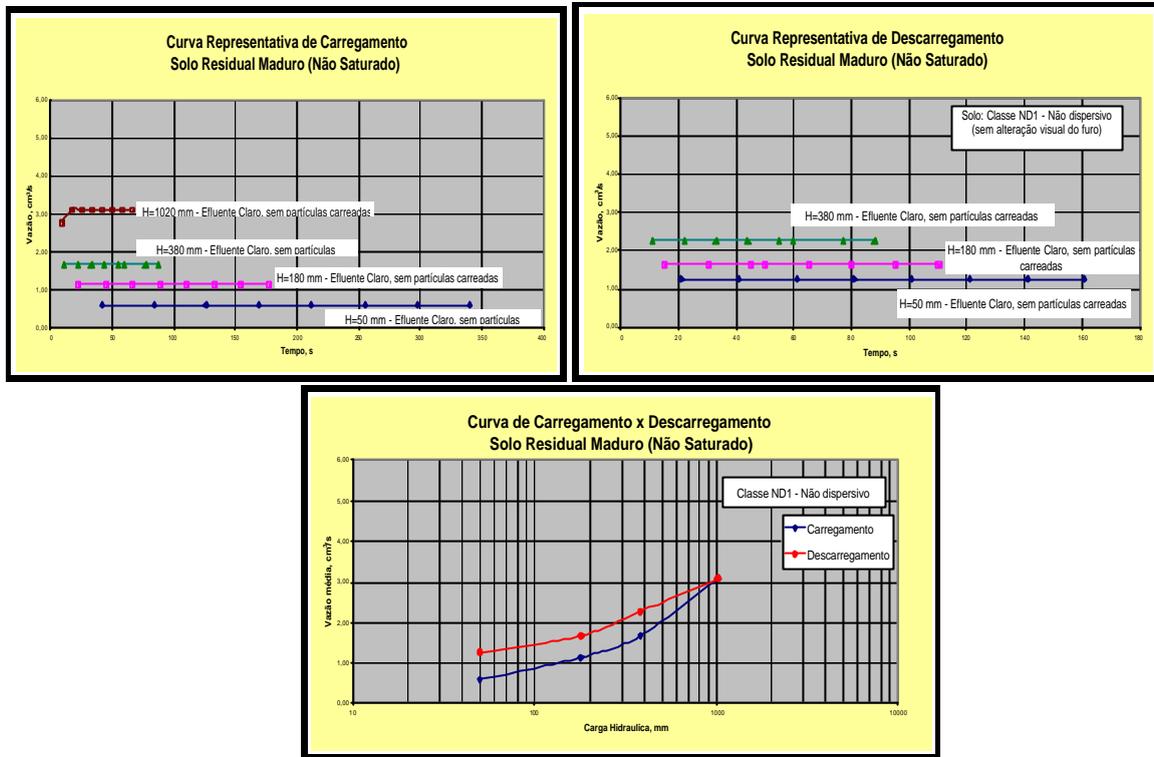
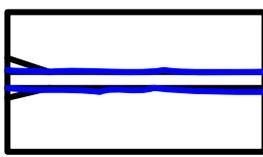


Figura 5.25 – Resultados do Ensaio, tempo e carga hidráulica em função da vazão (SRM)

Tabela 5.10 – Condições de moldagem do Corpo de Prova para o ensaio (SRM)

Condições de Moldagem do corpo de prova	Índice físico inicial	Croqui do corpo de prova
<ul style="list-style-type: none"> • Corpo de Prova: compactado, sem secagem prévia. • N° de camadas = 05 • Grau de compactação = 95% • Altura do corpo de prova = 4cm • Diâmetro do corpo de prova = 3,71cm • $(h-h_{OT}) = 5,3\%$ • $h_{final} = 32,9\%$ 	$\delta_r = 2,770g/cm^3$ $h_{OT} = 21,2\%$ $g_{smáx} = 1,561g/cm^3$ $g_s = 1,483g/cm^3$ $h = 26,4\%$	 Classificação quanto a dispersibilidade ND1 (sem alteração visual do furo) Não dispersivo

Após a observação dos dados referentes à Tabela 5.10, verifica-se as seguintes características de moldagem para o solo ensaiado:

- grau de compactação igual a 95%, em relação ao Proctor Normal;
- umidade ótima $h_{OT} = 21,2\%$ para uma densidade seca dos grãos de $1,561 \text{ g/cm}^3$ ficando os valores referentes ao teor de umidade higroscópica em $6,9\%$ e para umidades inicial e final em $26,4\%$ e $32,9\%$, respectivamente, estando o último valor próximo ao limite de plasticidade deste solo, que é de 35% .

Para os gráficos da Figura 5.25, tensão e carga hidráulica versus vazão, conclui-se que para carga inicial de 50mm sobre um regime de fluxo constante de 25ml/seg incidente sobre a amostra, a percolação média do efluente foi de 0,59ml/seg para os primeiros 5 minutos, onde a água observada apresentou coloração completamente clara sem a presença de partículas carregadas. Situação esta, mantida até o final da aplicação das cargas de 180mm, 380mm e 1020mm, tendo estas cargas apresentando como vazão média os seguintes valores, 1,14ml/seg, 1,67ml/seg e 3,08ml/seg, respectivamente, com tempo de duração nessa fase de 30 minutos.

Para a fase de alívio do ensaio, até o retorno a carga inicial de 50mm, o tempo de duração foi de 20 minutos, não sendo notado neste período nenhuma anormalidade quanto a vazão, mantendo-se essa nos níveis aceitáveis para cada etapa do ensaio, quais sejam: cargas de 380mm, 180mm e 50mm, com vazões médias de 0,59ml/seg, 1,14ml/seg e 1,67ml/seg, respectivamente. Desta forma, o solo pode ser classificado como (ND1), sem alteração visual do furo, portanto de comportamento não dispersivo, conforme Tabela 5.10 e Figura 5.26.

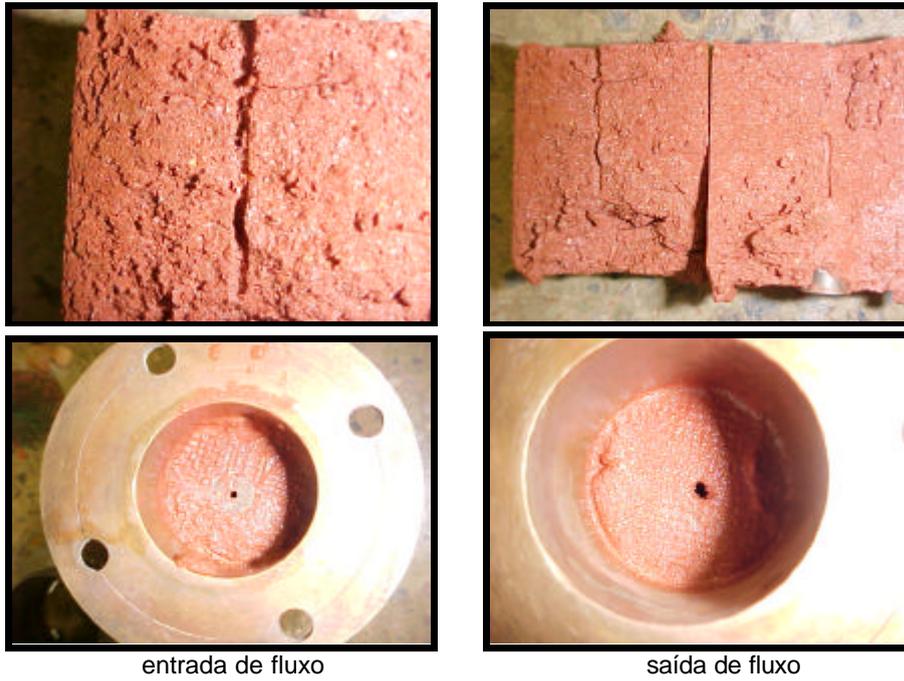


Figura 5.26 – Fotos Representativas da amostra de Solo Residual Maduro após o ensaio

Solo Residual Jovem A

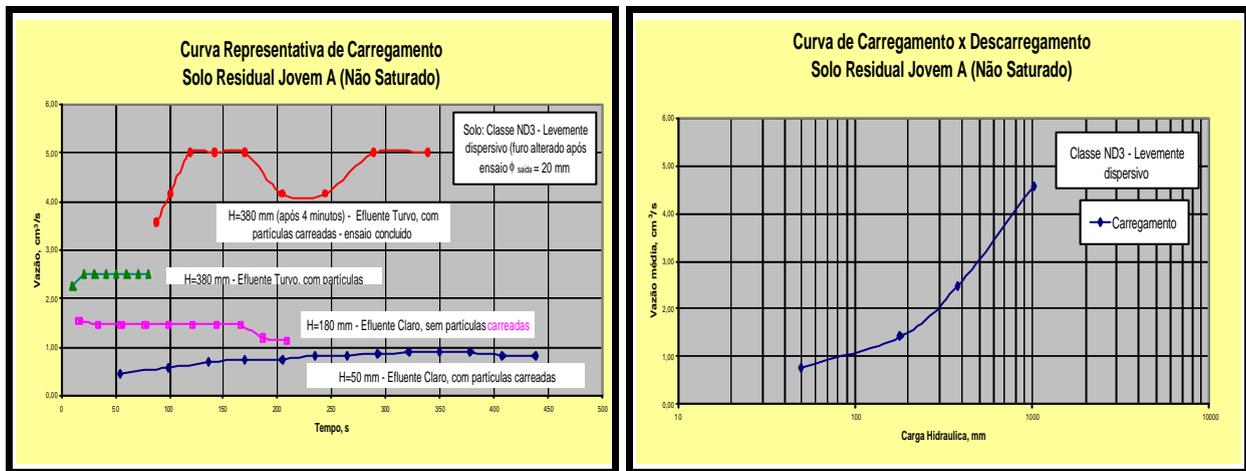
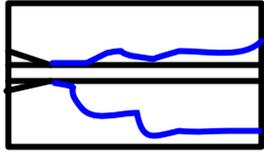


Figura 5.27 – Resultados do Ensaio, tempo e carga hidráulica em função da vazão (SRJA)

Tabela 5.11 – Condições de moldagem do Corpo de Prova para o ensaio (SRJ-A)

Condições de Moldagem do corpo de prova	Índice físico inicial	Croqui do corpo de prova
<ul style="list-style-type: none"> Corpo de Prova: compactado, sem secagem prévia Nº de camadas = 05 Grau de compactação = 95% Altura do corpo de prova = 4cm Diâmetro do corpo de prova = 3,71cm $(h-h_{OT}) = 6,0\%$ $h_{final} = 35,5\%$ 	$\delta r = 2,703g/cm^3$ $h_{OT} = 21,2\%$ $g_{smáx} = 1,625g/cm^3$ $g_s = 1,544g/cm^3$ $h = 26,4\%$	
		Classificação quanto a dispersibilidade
		D1 (furo alterado após ensaio, diâmetro com ~ 20mm na saída) Altamente dispersiva

Observando-se os dados constantes da Tabela 5.11, conclui-se que as seguintes características técnicas de moldagem para o solo são as que seguem:

- grau de compactação igual a 95%, em relação ao Proctor Normal;
- umidade ótima $h_{OT} = 17,8\%$ para um valor de densidade seca máxima dos grãos de $1,625 g/cm^3$ ficando, os valores referentes ao teor de umidade higroscópica em 9,2% e para umidades inicial e final em 24,1% e 35,5%, respectivamente, estando o último valor acima do limite de plasticidade do solo, que é de 25%.

Para os gráficos da Figura 5.27, tempo e carga hidráulica versus vazão, conclui-se que para carga inicial de 50mm sobre um regime de fluxo constante de 25ml/seg, incidente sobre a amostra, a percolação média do efluente foi de 0,73ml/seg para os primeiros 5 minutos, onde a água observada apresentou nos primeiros 90 segundos, uma pequena a média variação de coloração com poucas partículas carregadas, mantendo-se a partir deste ponto, até a etapa final deste estágio, em condições de coloração completamente clara sem ter sido observado carregamento de partículas, permanecendo nesta condição até o final da carga hidráulica de 180mm, que apresentou vazão média de 1,22ml/seg.

Para a carga hidráulica de 380mm, com vazão média de 2,47ml/seg, após aproximadamente 4 minutos do início deste estágio, a água começou a sair turva, com poucas partículas carregadas. Dessa forma, optou-se por manter a mesma carga aplicada, onde se puderam observar as mesmas condições ocorridas no estágio anterior, sendo que após decorridos aproximadamente 5 minutos, a vazão média aumentou para 4,56 ml/seg sinalizando um aumento do diâmetro do furo da amostra, dando-se o ensaio como concluído.

Sendo assim, classifica-se o solo como sendo altamente dispersivo (D1), com alteração visual no diâmetro de saída do furo de 20mm, o que corresponde a aproximadamente duas vezes o diâmetro inicial do furo da amostra conforme croqui do ensaio constante da Tabela 5.11 confirmado pela visualização da Figura 5.28.

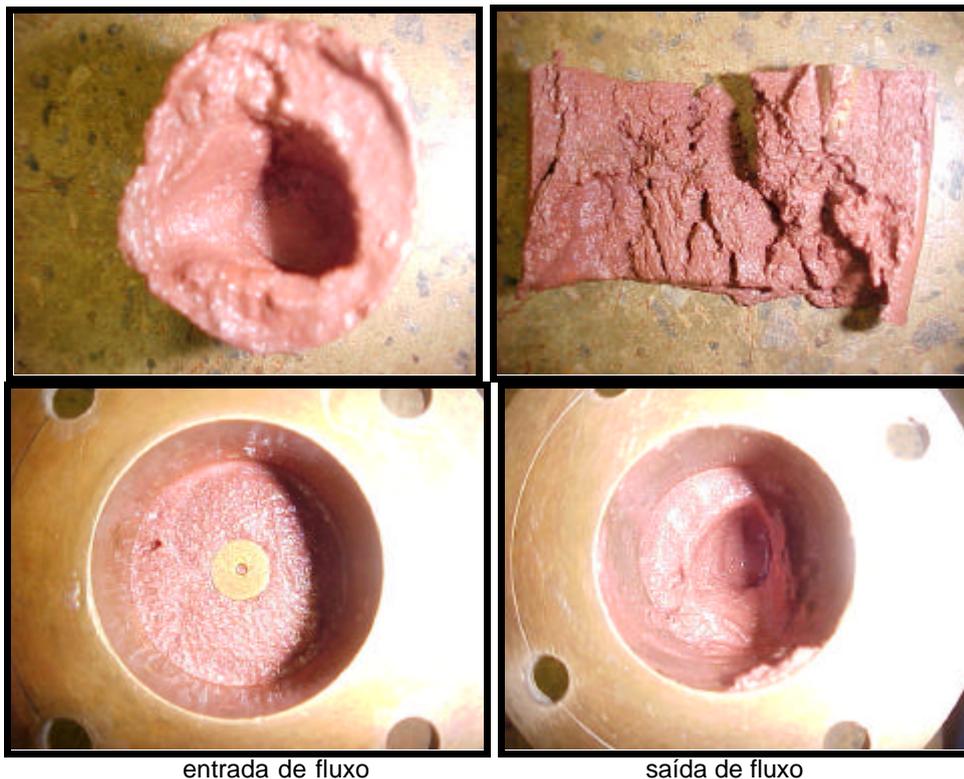


Figura 5.28 – Fotos Representativas da amostra de Solo Residual Jovem A após o ensaio

Solo Residual Jovem B

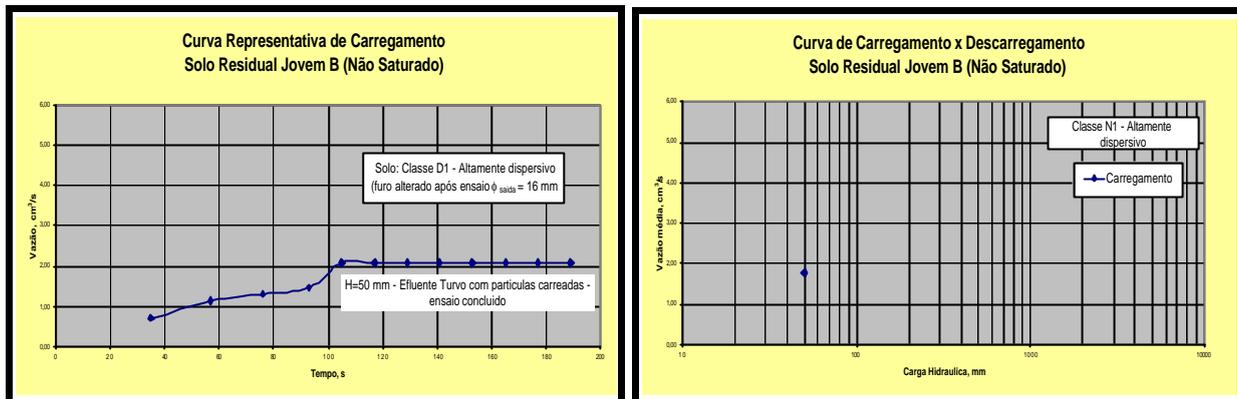
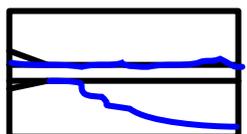


Figura 5.29 – Resultados do Ensaio, tempo e carga hidráulica em função da vazão (SRJ-B)

Tabela 5.12 – Condições de moldagem do Corpo de Prova para o ensaio (SRJ-B)

Condições de Moldagem do corpo de prova	Índice físico inicial	Croqui do corpo de prova
<ul style="list-style-type: none"> Corpo de Prova: compactado, sem secagem prévia. Nº de camadas = 05 Grau de compactação = 95% Altura do corpo de prova = 4cm Diâmetro do corpo de prova = 3,71cm $(h-h_{OT}) = 4,0\%$ $h_{final} = 34,6\%$ 	$\bar{\alpha} = 2,715g/cm^3$ $h_{OT} = 16,5\%$ $g_{smax} = 1,717g/cm^3$ $g_s = 1,631g/cm^3$ $h = 20,6\%$	 <p>Classificação quanto a dispersibilidade</p> <p>D1 (furo alterado após ensaio, diâmetro com ~ 16mm na saída) Altamente dispersivo</p>

Para a amostra analisada, foram obtidas as seguintes características de moldagem do solo, constantes da Tabela 5.12:

- grau de compactação igual a 95%, em relação ao Proctor Normal;
- umidade ótima $h_{OT} = 16,5\%$ para um valor de densidade seca dos grãos de $1,631g/cm^3$ ficando os valores referentes ao teor de umidade higroscópica em 5,12% e para umidades inicial e final em 20,6% e 34,6%, respectivamente, estando o último valor acima do limite de plasticidade do solo, que é de 25%.

Para os gráficos da Figura 5.29, tempo e carga hidráulica versus vazão, conclui-se que para carga inicial de 50mm sobre um regime de fluxo constante

de 25ml/seg incidente sobre a amostra, a percolação do efluente subiu no primeiro minuto de 0,71ml/seg para 2,08ml/seg, onde a água apresentou coloração escura com poucas partículas carregadas, permanecendo assim com o tempo, o que caracteriza que a amostra foi erodida, notando-se assim, a presença de argila dispersiva na composição desse solo.

Neste caso, deu-se prosseguimento ao ensaio até atingir o período de 10 minutos, sendo mantida as condições iniciais do ensaio ao fim deste tempo, o que por imposição da norma deu-se o ensaio como concluído. Dessa forma, classifica-se este solo como altamente dispersivo (D1), ficando o furo da amostra de solo após o ensaio, com diâmetro de saída de aproximadamente 16mm, ou seja, o que corresponde à aproximadamente duas vezes o diâmetro inicial do furo da amostra, conforme representação esquemática e fotográfica constantes da Tabela 5.12 e Figura 5.30.

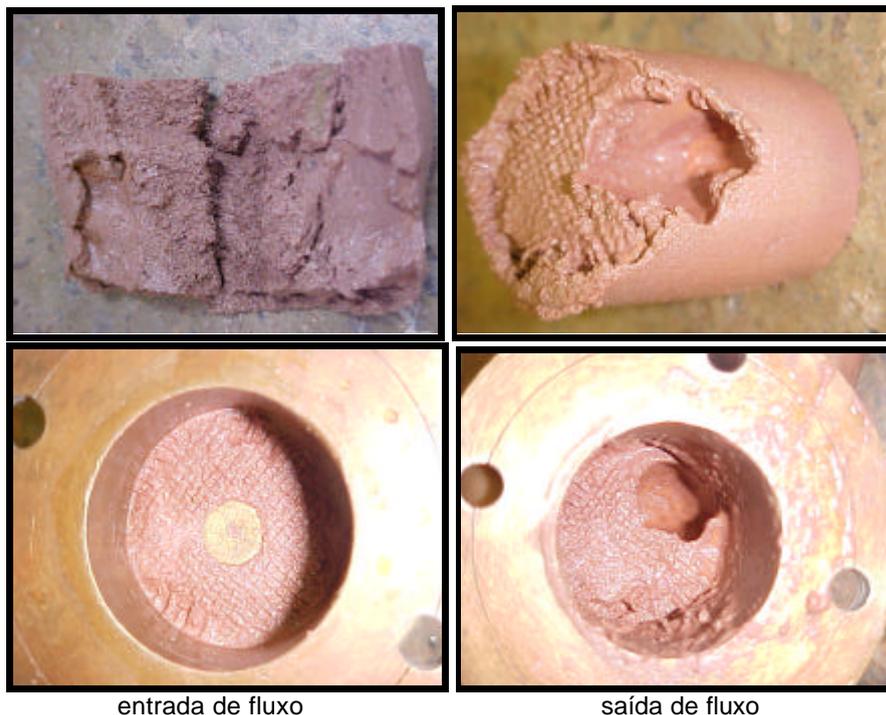


Figura 5.30 – Fotos Representativas da amostra de Solo Residual Jovem B após o ensaio

b) Ensaio com Amostra Natural

Neste ensaio, utilizou-se a mesma metodologia para amostra amolgada, com diferença somente quanto às condições de moldagem do corpo de prova.

A seguir, procedeu-se aos ensaios, cujos resultados foram analisados em função dos gráficos apresentados e comparados com os valores obtidos pelo ensaio com amostra compactada, a fim de se definir qual dos dois métodos melhor se aplica ao solo estudado.

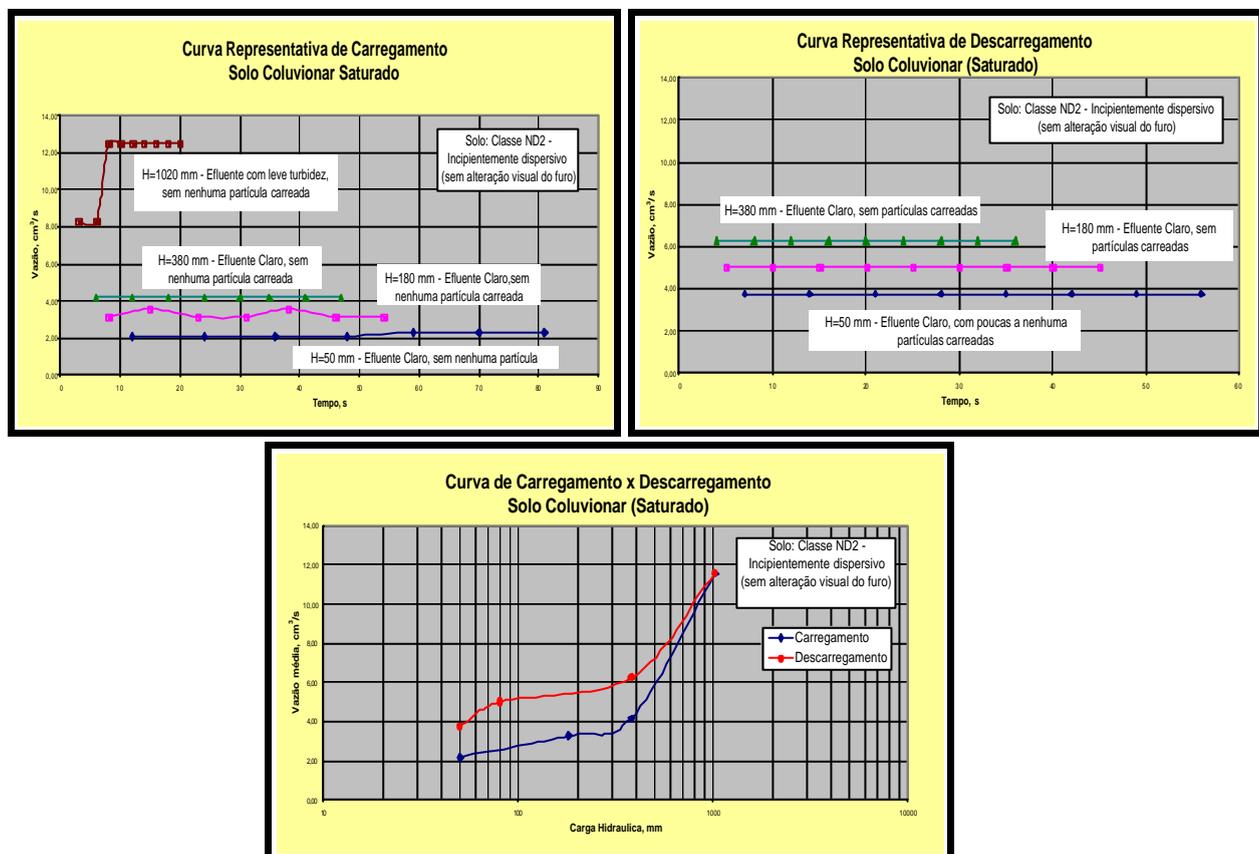


Figura 5.31 – Resultados do Ensaio, tempo e carga hidráulica em função da vazão (SC)

Dos gráficos acima, obteve-se as vazões médias de 2,16 cm³/seg, 3,26 cm³/seg, 4,17 cm³/seg e 11,57 cm³/seg, para cargas hidráulicas de 50mm, 180mm, 380mm e 1020mm, respectivamente. O que corresponde, em média, a

cerca de três vezes dos valores das vazões sob influência das cargas hidráulicas de 50mm, 180mm, 380mm e cinco vezes para a carga hidráulica de 1020mm, para o mesmo solo no estado compactado.

Já para a fase de descarregamento, os valores obtidos para as vazões foram de 1,39 cm³/seg, 1,0 cm³/seg e 0,66 cm³/seg, para as cargas hidráulicas de 380mm, 180mm e 50mm, respectivamente. O que representa em média cinco vezes dos valores das vazões submetidas às mesmas condições de carregamento hidráulico no ensaio, com amostra compactada.

Solo Residual Maduro

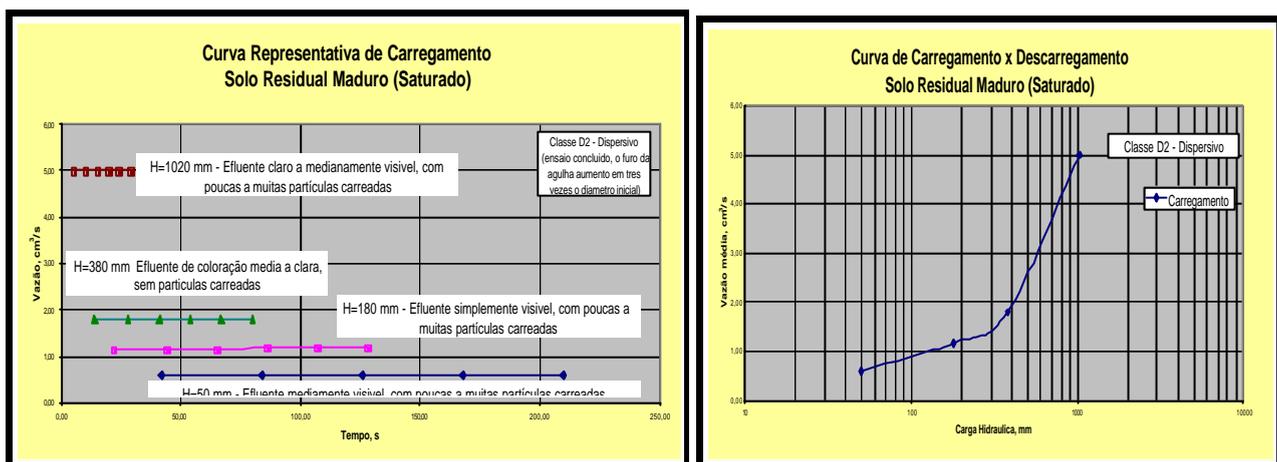


Figura 5.32 – Resultados do Ensaio, tempo e carga hidráulica em função da vazão (SRM)

Para esse solo, foram encontrados na fase de carregamento vazões médias de 0,60 cm³/seg, 1,79 cm³/seg e 5,0 cm³/seg, decorrentes das cargas hidráulicas de 50mm, 180mm, 380mm e 1020mm, respectivamente, sendo o ensaio dado como concluído nesta fase, em razão do diâmetro final do furo da agulha na amostra ter ficado duas vezes maior do que o seu diâmetro inicial.

Já para o solo compactado, submetido às mesmas condições de carregamento, não foram observadas alterações na amostra durante as fases

desse ensaio. Além disso, pôde-se observar que este solo foi o que apresentou maior grau de alterabilidade nos ensaios de erodibilidade a que foi submetido. Portanto, optou-se pelo resultado apresentado por este método, em função de ser o que melhor representa as condições de dispersibilidade apresentadas por este solo.

Solo Residual Jovem A

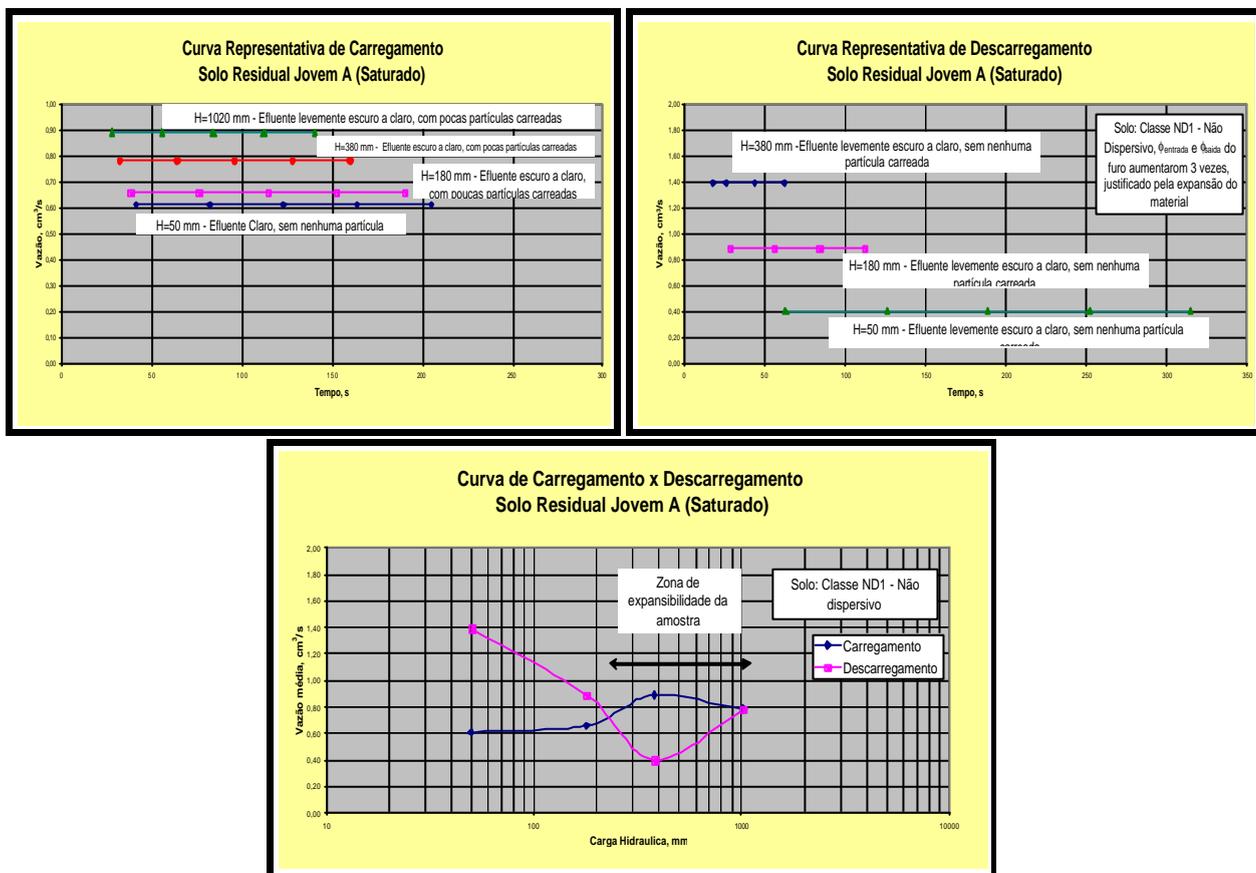


Figura 5.33 – Resultados do Ensaio, tempo e carga hidráulica em função da vazão (SRJA)

As vazões obtidas nos gráficos acima são de $0,61 \text{ cm}^3/\text{seg}$, $0,89 \text{ cm}^3/\text{seg}$ e $0,78 \text{ cm}^3/\text{seg}$, para cargas hidráulicas de 50mm, 180mm, 380mm e 1020mm, respectivamente. Obtendo-se na fase de descarregamento vazões médias de $0,40 \text{ cm}^3/\text{seg}$, $0,89 \text{ cm}^3/\text{seg}$ e $1,39 \text{ cm}^3/\text{seg}$, para cargas hidráulicas decrescentes de 380mm, 180mm e 50mm. O que classifica esse solo como não dispersivo,

contrariando o resultado encontrado para o mesmo ensaio, com solo compactado, que apresentou uma vazão média (6x) superior a vazão encontrada para o último estágio de carregamento hidráulico (1020mm), onde o ensaio foi concluído.

Pelas evidências apresentadas nos ensaios correlatos a erodibilidade desse solo, este método é o que melhor representa as condições de dispersibilidade do solo, mostrando inclusive no gráfico carga hidráulica versus vazão, uma zona de expansibilidade desse solo.

Solo Residual Jovem B

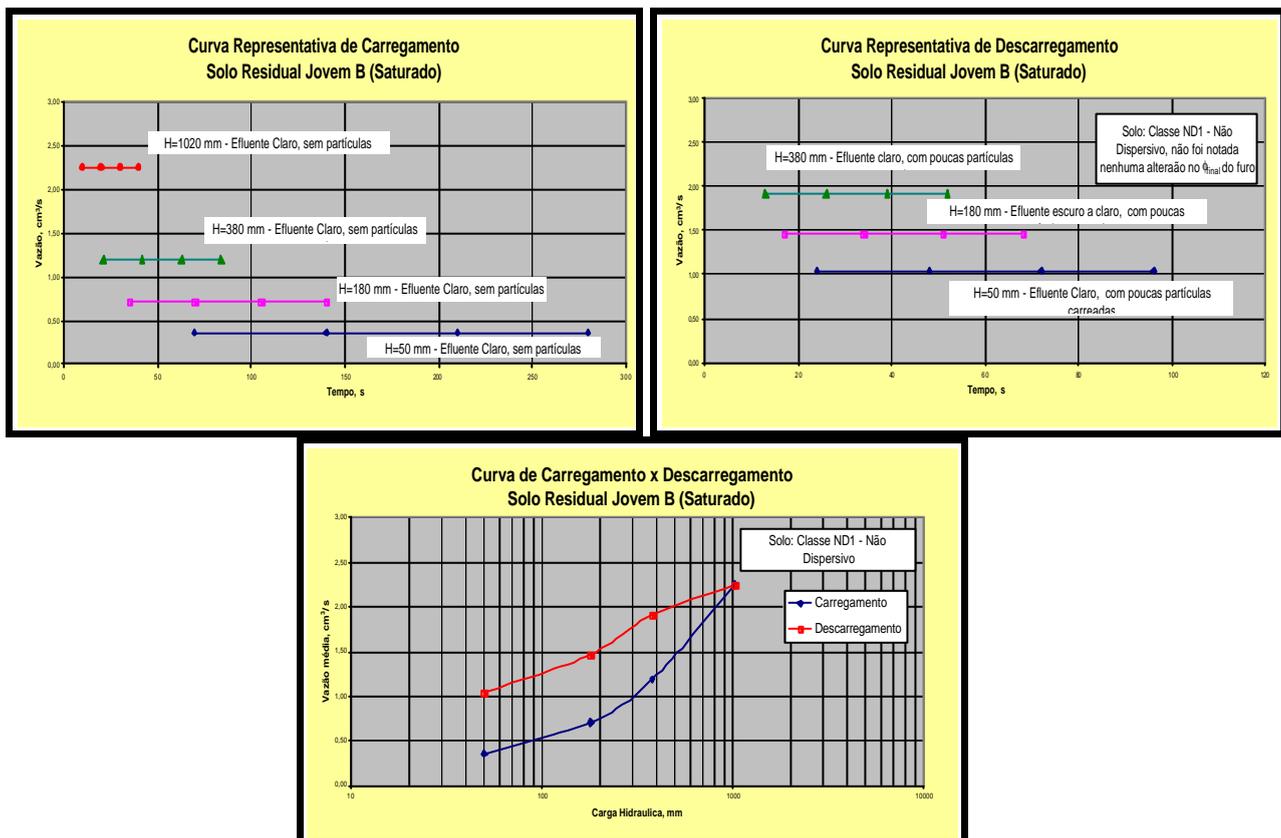


Figura 5.34 – Resultados do Ensaio, tempo e carga hidráulica em função da vazão (SRJB)

Foram obtidas neste ensaio, vazões médias de 0,36 cm³/seg, 0,75 cm³/seg, 1,19cm³/seg e 2,25 cm³/seg, para cargas hidráulicas de 50mm, 180mm,

380mm a 1020mm, respectivamente. Ficando os valores médios de vazões, na fase de descarregamento, em 1,92 cm³/seg, 1,47 cm³/seg e 1,04 cm³/seg, para cargas de 380mm, 180mm e 50mm, respectivamente.

Uma comparação desses resultados com os do solo compactado, mostra uma grande diferença entre os dois métodos, principalmente por ter o primeiro atingindo somente a primeira fase, onde o ensaio foi dado como concluído.

As comparações dos resultados entre as duas metodologias para os ensaios a que este solo foi submetido mostram ser este o método que melhor resultado apresenta para caracterização deste solo com relação a dispersibilidade.

Um comentário geral sobre os resultados obtidos entre os dois métodos utilizados neste ensaio, é apresentado no capítulo seis desta dissertação.

5.4.4. Ensaios de *Inderbitzen*

Para um melhor entendimento e quantificação do grau de erodibilidade ocorrido nos quatro tipos de solos estudados, foram moldados corpos de provas referentes aos solos, que receberam as seguintes classificações, a saber: Solo Coluvionar (SC), Solo Residual Maduro (SRM), Solo Residual Jovem-A (SRJ-A) e Solo Residual Jovem-B (SRJ-B), cujas profundidades e caracterização constam da Tabela 5.1, e as perdas totais de solos são representadas pelos gráficos e tabelas descritos na análise dos resultados a seguir.

- **Metodologia**

Originalmente este ensaio foi proposto por Inderbitzen (1961), que consiste em simular um escoamento superficial de água sobre a superfície transversal de um corpo de prova, sujeito a uma dada vazão imposta, umidade da amostra e inclinação da rampa, qualificando-se dessa forma a perda de solo

em função de um tempo pré-determinado. Para tanto, utiliza-se uma rampa com um furo circular central, no qual coloca-se a amostra de solo com a sua superfície nivelada com o topo do plano da rampa, concebida de forma a sofrer variações angulares, sendo o material carregado pelo fluxo e coletado por um conjunto de peneiras colocadas na base da rampa (Figura 5.35).



Figura 5.35 – Ensaio de Inderbitzen em andamento

No Brasil, Rego (1978) foi precursor na introdução do ensaio de Inderbitzen, para o estudo de erosões superficiais de taludes em solos residuais de gnaiss no estado do Rio de Janeiro, definindo o potencial de erodibilidade, a partir da perda de solo, como sendo dada pelo peso do solo acumulado, coletado nos respectivos tempos, dividido pela área da amostra de solo. Ferreira (1981) *apud* Fácio (1991), “o ensaio de Inderbitzen tem por finalidade medir a erosão de uma amostra de solo indeformadas ou compactada sob diversas condições de vazão, inclinação do topo da amostra e umidade”.

Fácio (1991), estudando solos do Distrito Federal procurou estabelecer uma metodologia padrão para este ensaio, buscando uma melhor maneira na “determinação da vazão, do tempo e da rampa ideal de trabalho”. A partir de

uma série de ensaios com avaliação de valores de vazão, declividade da rampa e tempo de duração, o autor propôs uma rampa com 0,33 metros de largura por 1,30 metros de comprimento e declividade de 10°, sobre a qual fez percolar um fluxo de água com uma vazão pré-estabelecida de 50 ml/s, atuando sobre a seção transversal de uma amostra de solo indeformada, com 100 mm de diâmetro, sendo esta nivelada com a superfície da rampa, após ter sido submetida ao tempo de embebedimento de 15 minutos, que visa anular eventuais forças de sucção presentes nesta no seu estado natural, sendo o tempo de duração do ensaio estabelecido em 20 minutos.

O solo erodido pelo fluxo superficial foi retido nas peneiras de nºs. (# 50), (# 100) e (# 200), sendo o conjunto lavado e o solo recolhido em beakers, para serem secos em uma estufa a uma temperatura de 110°C e depois pesados, repetindo-se essa operação a cada troca de peneiras. O autor propôs ainda, que os resultados obtidos fossem apresentados sobre a forma de gráficos de perda acumulada de solo expressa em (g/cm²) em função do tempo de duração (em minutos), facilitando deste modo uma análise comparativa dos resultados encontrados.

Santos (1997), descreve que “visando melhorar a qualidade dos resultados obtidos foram feitas algumas modificações no aparelho utilizado por Fácio (1991)”. Sendo assim, o autor prossegue descrevendo que a rampa sobre a qual insid o fluxo d’água teve sua largura reduzida para 100 mm, assegurando que todo fluxo d’água gerado fluísse unicamente sobre a amostra e não ao seu lado, como às vezes ocorria (Figura 5.35), diminuindo dessa forma a vazão para 17,5 ml/seg sem, contudo alterar as condições de ensaio proposta por Fácio (1991). Com as modificações sugeridas, o tempo de duração do ensaio passou de 20 para 30 minutos, resultando uma melhor caracterização do comportamento entre a curva de perda de solo com o tempo de duração previsto para o ensaio.

Com relação à apresentação dos resultados, os autores mantêm a proposta inicial, com os valores de perda de solo sendo medidas em g/cm^2 e o tempo em minutos. Quanto à avaliação da erodibilidade deste ensaio, os autores consideram os resultados bastante representativos com as observações da ocorrência desses fenômenos no campo e verificam também uma boa correlação entre os seus resultados com os ensaios de desagregação dos solos.

- **Análise dos Resultados**

Para os ensaios realizados, foram utilizadas as condições propostas por Santos (1997), com exceção da vazão, que para o ensaio foi mantida a proposta por Fácio (1991), 50ml/s, que visa melhorar a qualidade dos resultados a serem obtidos. O material carregado pelo fluxo superficial foi coletado em peneiras com aberturas de 0,297 mm (# 50), 0,149 mm (# 100) e 0,0074 mm (# 200), com intervalos de tempo pré-fixados a cada 5 minutos na parte inicial de cada ensaio, passando por mais três estágios consecutivos de 10 minutos cada, até atingir o tempo máximo de duração de 30 minutos, estabelecido para cada ensaio.

Os resultados obtidos foram plotados em gráficos sobre a forma de curvas de perda de solos, cujos valores são expressos em (g/cm^2) com o tempo medido em segundos. Nota-se nos gráficos apresentados, que a maior quantidade de perda de solo ocorre nos 5 minutos iniciais de cada ensaio, onde as curvas apresentam-se de forma mais acentuada, tendo sido esta tendência observada também por Fonseca e Ferreira (1981), ao realizarem ensaios do mesmo tipo.

Para uma melhor visualização e entendimento desse ensaio, passase a análise dos resultados de acordo com os gráficos e tabelas originados, levando-se em conta a ordem crescente dos valores de perda de solo em função do

tempo previsto para cada ensaio. De forma complementar ao estudo de perda de solo, acrescentou-se uma capa de solo superficial laterítico com aproximadamente 10 centímetros de espessura, que ocorre praticamente em toda região estudada sobre a camada de solo desprovida de vegetação.

A seguir, para um melhor entendimento deste ensaio, apresenta-se sobre forma de gráfico a quantidade de perda total de solo acumulada de amostras indeformadas, cujos resultados obtidos constam em tabelas anexas, os quais passa-se a comentar (Figura 5.36).

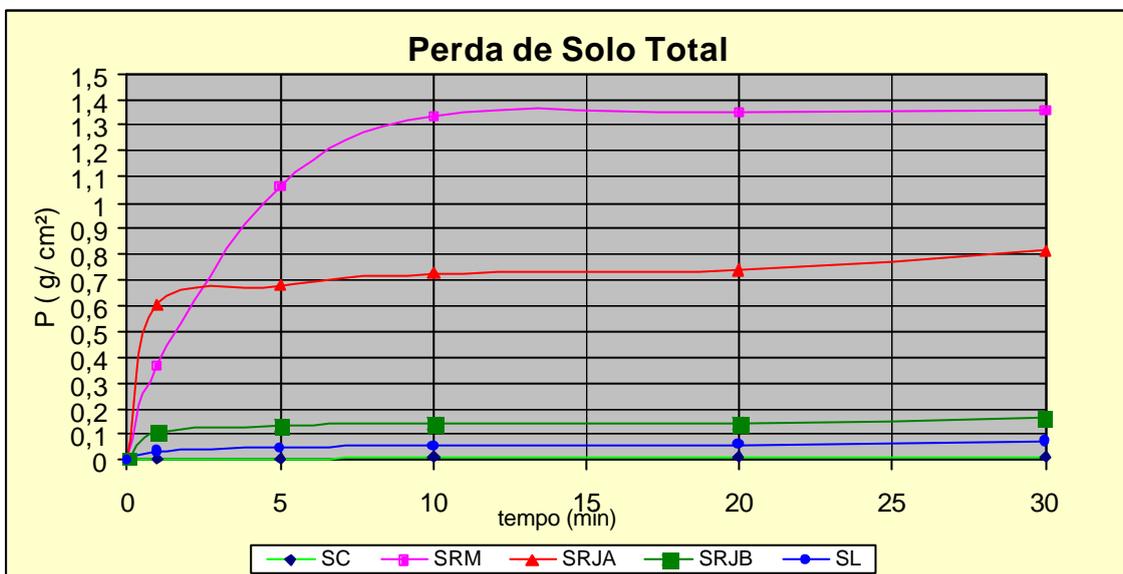


Figura 5.36 – Resultado da perda de solo total das amostras

Para exemplificar, uma primeira análise é feita sobre o comportamento das curvas que representam a perda do solo Coluvionar em função do tempo previsto para esse ensaio, conforme Tabela 5.13, que deu origem ao gráfico constante da Figura 5.37.

Tabela 5.13 – Quadro resumo da quantidade de perda do Solo Coluvionar

PENEIRAS # 50	Material erodido (g)	acumulado	acum. / área (g/cm²)
0 min	0	0	0
1 min	0,19	0,19	0,002419155
5 min	0,09	0,28	0,003565071
10 min	0,08	0,36	0,004583662
20 min	0,04	0,4	0,005092958
30 min	0,02	0,42	0,005347606
# 100	Material erodido (g)	acumulado	acum. / área (g/cm²)
0 min	0	0	0
1 min	0,17	0,17	0,002164507
5 min	0,05	0,22	0,002801127
10 min	0,03	0,25	0,003183099
20 min	0,02	0,27	0,003437747
30 min	0,01	0,28	0,003565071
# 200	Material erodido (g)	acumulado	acum. / área (g/cm²)
0 min	0	0	0
1 min	0,11	0,11	0,001400563
5 min	0,04	0,15	0,001909859
10 min	0,06	0,21	0,002673803
20 min	0,02	0,23	0,002928451
30 min	0,01	0,24	0,003055775
TEMPO	Total acumulado/ área (g/cm²)		
0 min	0		
1 min	0,005984226		
5 min	0,008276057		
10 min	0,010440564		
20 min	0,011459156		
30 min	0,011968452		



Figura 5.37 – Resultado da perda de Solo Coluvionar

Analisando-se o comportamento não linear das curvas representadas pelo gráfico acima (Figura 5.37), verifica-se que a quantidade de material erodido sob uma vazão constante estabelecida em 50 ml/s, incidente sobre a seção transversal de um corpo de prova com 100 mm de diâmetro e área de $78,54 \text{ cm}^2$, colocado em um furo central e nivelado com a superfície de uma rampa sujeita a uma inclinação de $\alpha = 10^\circ$ (Figura 5.33), ocorre com maior frequência nos primeiros 5 minutos iniciais deste ensaio, que apresenta um valor total de material erodido acumulado de $(0,008276057 \text{ g/cm}^2)$ representado pelos gráficos acima, que após esse tempo passam a ter um comportamento com tendência de crescimento constante, porém de forma contínua e acentuada, até o término de cada ensaio, com tempo previsto de 30 minutos, cuja perda de solo total é de $(0,011968452 \text{ g/cm}^2)$.

Para uma capa do solo laterítico com ocorrência sobre o solo coluvionar, adotou-se o mesmo procedimento de forma a aferir a resistência desse solo quanto a processos erosivos, conforme representado a seguir.

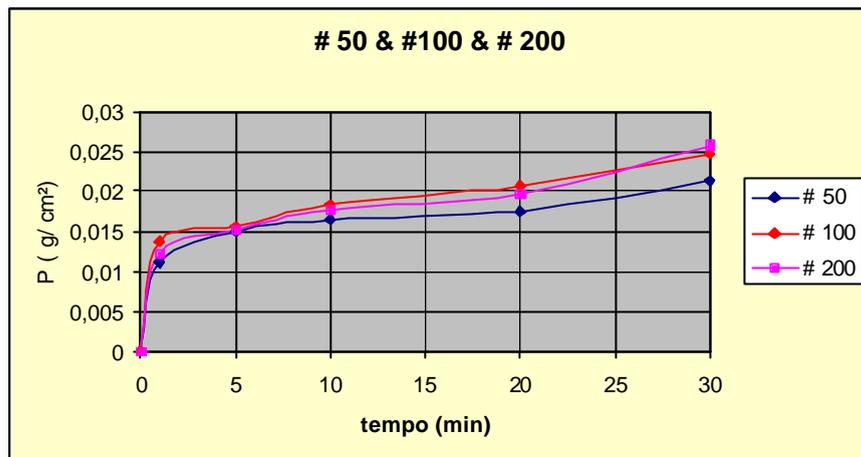


Figura 5.38 – Resultado da perda de Solo Laterítico

Observa-se no gráfico acima, uma rápida perda de solos nos 5 minutos iniciais deste ensaio, onde as curvas apresentam-se de certa forma bem homogêneas e com uma inclinação bastante acentuada, apresentando uma perda de solo total de (0,045963948 g/cm²), após o que, essas curvas tendem a se comportarem de uma forma mais harmônica até a conclusão deste ensaio, no tempo pré-estabelecido de 30 minutos, apresentando ao fim deste tempo uma perda total de solo de (0,07181071g/cm²), ficando este valor acima da perda total de solo atribuída ao solo coluvionar, para o mesmo período de tempo.

Seguindo-se uma cronologia dos solos estudados, passa-se a analisar as condições do solo Residual Jovem-B, terceiro na ordem de classificação de perda de solo, conforme o resultado apresentado no gráfico a seguir (Figura 5.39).

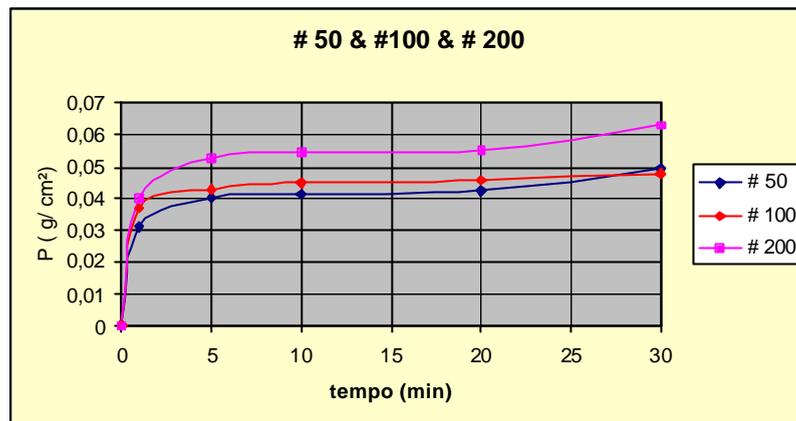


Figura 5.39 – Resultado de perda de solo (SRJ-B)

Analisando-se o gráfico acima, observa-se mais uma vez uma rápida perda de solo durante os cinco primeiros minutos iniciais do ensaio, onde as curvas apresentam uma inclinação fortemente acentuada, com perda de solo total de $(0,136363955\text{g/cm}^2)$, ficando este valor bem acima do atribuído ao solo coluvionar que é de $(0,008276057\text{g/cm}^2)$, para o mesmo tempo de ensaio, após o que, observar-se um comportamento crescente e harmônico com tendência a estabilização para a maioria das curvas, com exceção para a curva que representa o material retido na primeira # 200, que se distancia das demais curvas, devido à constatação de uma maior ocorrência da erodibilidade do solo nesta fase do ensaio. Sendo apresentando como perda total de solo, ao final dos 30 minutos, o valor de $(0,160173535\text{g/cm}^2)$.

Quanto ao solo Residual Jovem-A, situado no terço médio da erosão estudada, foi classificado como sendo o quarto na ordem crescente de erodibilidade para os solos submetidos a este tipo de ensaio. Dessa forma, foram plotadas as curvas representativas de perda de solo (em g/cm^2) em função do tempo (em minutos) previsto para realização desse ensaio, conforme gráfico constante da Figura 5.40.

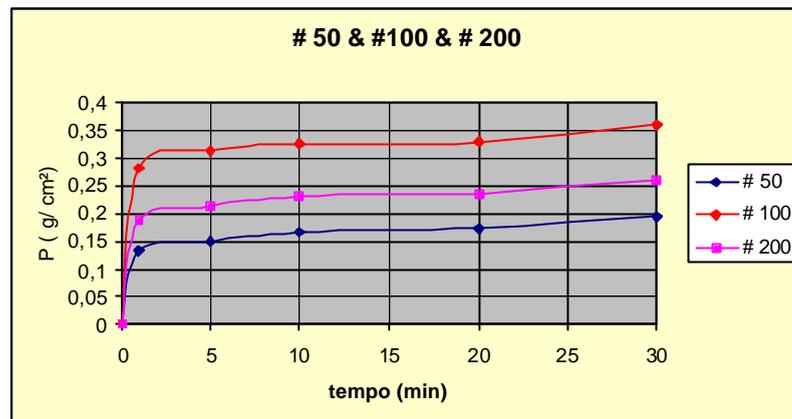


Figura 5.40 – Resultado da perda de solo (SRJ-A)

Observando-se o gráfico acima, nota-se uma tendência elevada de perda de solo no primeiro quarto de minuto, após o que essas curvas tendem a se separar de modo a apresentar, nos 5 minutos iniciais do ensaio, uma maior perda de solo total correspondente a $(0,678636677\text{g/cm}^2)$, em relação ao Solo Coluvionar e Residual Jovem-B, para o mesmo tempo de ensaio, cabendo a este uma maior quantidade de perda de solo total, na peneira # 100. Ficando a perda de solo total ao final do ensaio com o valor de $(0,814873309\text{g/cm}^2)$.

Por último passa-se a analisar o comportamento do solo Residual Maduro, que comprova ser este solo o de maior susceptibilidade a sofrer processos erosivos, dentre os solos analisados nesse ensaio. Para tanto, foram plotadas as curvas de perda de solo (em g/cm^2) em função do tempo (em minutos) previsto para a sua realização, de acordo com o gráfico e as respectivas curvas de perda de solo constantes da Figura 5.41.

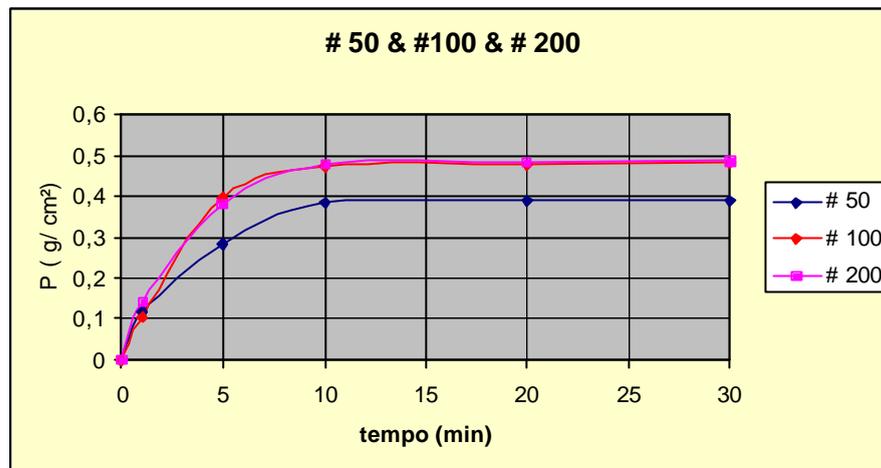


Figura 5.41 – Resultado da perda de solo (SRM)

A análise das curvas de perda de solo, em função do tempo, revela também, para o gráfico da Figura 5.41, uma tendência acelerada de perda de solo nos primeiros 5 minutos iniciais ficando este valor na ordem de $(1,063536992\text{g/cm}^2)$ bem acima dos demais solos até aqui estudados, para o mesmo tempo de ensaio. Nota-se uma maior quantidade de solo erodido acumulado na peneira # 200, ou seja, $0,487396098\text{g/cm}^2$ para o tempo de 30 minutos. Sendo que ao final do ensaio a perda de solo total acumulada, ficou em $(1,358546\text{g/cm}^2)$, bem acima dos resultados apresentados para os demais solos.

5.5. Ensaio Especiais

5.5.1. Análise Química do Solo e da Água Intersticial

Para análise, além dos solos estudados, optou-se por incluir uma camada de solo superficial laterítico, desprovida de cobertura vegetal, sujeita à elevada concentração e distribuição de fluxo de água, durante os períodos de precipitações pluviométricas, resultando num processo de dinâmica erosiva diferencial, denominou-se de solo erodido e não erodido, localizada ao longo das erosões, destacando-se uma área próxima à cabeceira da erosão estudada.

Dessa forma, foram realizadas análises químicas do solo e da água, cujos resultados e comentários constam a seguir.

Tabela 5.14 – Caracterização Química do Solo

Horizonte	pH (1:2,5)		Complexo Sortivo (cmol _c /kg)						
	H ₂ O	KCL 1N	Ca ²⁺ Mg ²⁺	K ⁺	Na ⁺	Valor S (S)	Al ³⁺	H ⁺	Valor T (S)
SC	5,5	5,3	0,7	0,03	0,00	0,73	0,6	0,9	1,93
SRM	4,5	4,2	0,7	0,03	0,01	0,74	0,9	0,4	1,64
SRJ-A	5,3	4,3	0,4	0,03	0,01	0,43	1,3	1,3	3,34
SRJ-B	5,4	4,3	0,3	0,03	0,01	0,34	0,0	1,5	1,73
SNE	4,9	5,5	0,2	0,02	0,01	0,23	1,4	1,2	3,23
SE	5,3	4,3	0,6	0,03	0,00	0,63	0,0	2,0	2,73

SE – solo erodido; SNE – solo não erodido; S – soma das bases; (T = S + Al³⁺ + H⁺)

Horizonte	Ataque sulfúrico (g/kg) H ₂ SO ₄ (1:1) – NaOH (0,8%)					
	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	TiO ₂	K _i	K _r
SC	106	189	88	18,2	0,95	0,73
SRM	174	182	61	7,8	1,63	1,34
SRJ-A	139	134	54	5,0	1,76	1,04
SRJ-B	126	114	30	3,7	1,88	1,61
SNE	96	214	124	22,4	0,76	0,56
SE	186	180	85	12,3	1,76	1,35

SE – solo erodido; SNE – solo não erodido

K_i = SiO₂. 1,70/Al₂O₃; K_r = (SiO₂/0,60)/(Al₂O₃/1,02) + (Fe₂O₃/1,60)

Tabela 5.15 – Análise Química da Água

Cátions		Características	
Potássio	1,03 mg/L	pH	5,5
Sódio	1,60 mg/L	Temperatura da água	21 graus
Magnésio	0,08 mg/L	Condutividade Elétrica	14,7 uS/cm
Cálcio	0,66 mg/L	Resistividade	0,07

As análises químicas das seis amostras de solos estudadas foram realizadas no laboratório de química do CNPS da EMBRAPA⁷-RJ. A metodologia adotada visa somente caracterizar a fração coloidal do solo,

⁷ Centro Nacional de Pesquisa de solos da Empresa Brasileira de Pesquisas Agrárias.

abrangendo argilominerais, óxidos e hidróxidos de ferro e de alumínio, além de materiais amorfos.

Os resultados obtidos constam da Tabela 5.14, onde são apresentados os teores de cátions, SiO_2 , Al_2O_3 , TiO_2 e pH em H_2O e KCL e os valores de S (soma de bases), T (troca iônica), K_i e K_r (relação molecular).

Os valores de cátions e, portanto de S, são muito baixo, mostrando tratar-se de solos muito lixiviados, ácidos, etc., como mostram os valores de pH nas tabelas 5.14 e 5.15.

Os baixos valores de T, são típicos de solos de baixa atividade com relação a retenção de cátions, o que está coerente com os valores de K_i e K_r .

Para o solo não erodido e coluvionar, os valores de K_i mostram que as respectivas frações argila são representadas por argilominerais, óxidos e hidróxidos de (Fe) e (Al) sendo essa uma característica comum dos solos lateríticos.

De acordo com a Tabela 5.15, a água coletada no interior da erosão estudada, apresenta valor de acidez e/ou alcalinidade, compatível com a água intersticial do solo. Todavia, a água com pH de 5,5 não é extremamente ácida, porém é suficiente para acelerar o processo de erosão em solos com as características químicas do estudado, principalmente aqueles que apresentam uma maior concentração em óxido de ferro (Fe_2O_3).

Com relação à condutividade elétrica da água, quanto maior ela for, menor será a sua resistividade e maior é a quantidade de íons em suspensão, sais em solução, tais como os a base de sódio, cálcio, potássio, dentre outros, presentes no solo estudado.

5.5.2. Caracterização Mineralógica (Difração de Raios-X)

O tipo de argilomineral constituinte de um solo, principalmente, tropical, é um dos principais fatores de influência quanto a uma maior ou menor susceptibilidade desse a sofrer processo erosivo. Mitchell (1993) descreve que essa ocorrência é um controlador do tamanho, forma e características superficiais da partícula de um solo e que juntos, estes atributos, determinam, entre outros, a plasticidade, expansibilidade e a resistência do solo.

Segundo Morgan (1986), a illita e esmectita apresentam maior expansibilidade e contração que a caulinita, conferindo dessa forma, uma menor estabilidade aos seus agregados do que os formados por este último argilomineral. O mesmo autor descreve ainda que: a estabilidade dos agregados determina a resistência dos solos.

- **Metodologia**

Mitchell (1993) observa que a análise quantitativa dos minerais com evidências nos picos dos difratogramas de raios-X gera incertezas devido a diferença no coeficiente de absorção, orientação das partículas, textura da superfície da amostra, cristalinidade dos minerais e hidratação, entre outros fatores.

Para o ensaio, a simples identificação dos argilominerais predominantes nas gêneses dos solos já é satisfatória para indicar uma possível tendência de diferença entre o comportamento desses solos. Em decorrência, a análise realizada para o ensaio foi apenas qualitativa.

Em decorrência, o ensaio de análise mineralógica por difratometria de raios-X, foi executado pelo método do pó, sem tratamento das amostras, de modo a submetê-las na forma pulverizada a um feixe de raios-X, que se difrata

ao atingir a sua superfície plana. Sendo este captado por um defletor que se movimenta a uma velocidade constante num arco de circuito centrado ao redor da amostra.

Os procedimentos adotados para caracterização das amostras dos solos Coluvionar (SC), Residual Maduro (SRM), Residual Jovem A (SRJA), Residual Jovem B (SRJB) e de uma camada de solo laterítico e desprovida de cobertura vegetal ao longo das erosões, sendo esta atingida por erosão diferencial caracterizada por uma parte de solo erodido -SE e solo não erodido-SNE, as quais se restringiram apenas às frações passadas nas peneiras #200 (0,074mm) e #400 (0,037mm).

Torna-se importante mencionar a caracterização da camada de solo não erodida e erodida, em razão das características peculiar inerentes a estes, tais como: ausência de camada vegetal e a sua extensão ao longo das erosões, os quais servem como grandes áreas de contribuição de água de chuva para o avanço do dinamismo dos processos erosivos.

- **Análise dos Resultados**

As análises foram executadas no laboratório de difração de raios-X do Departamento de Ciências de Materiais e Metalurgia (DEMM) da PUC-Rio, utilizando-se para tanto, um aparelho de difração modelo D5000, marca Siemens. Adotando-se para o ensaio uma velocidade de varredura de 0,02° por segundo, no intervalo entre 2° a 30° de 2 θ .

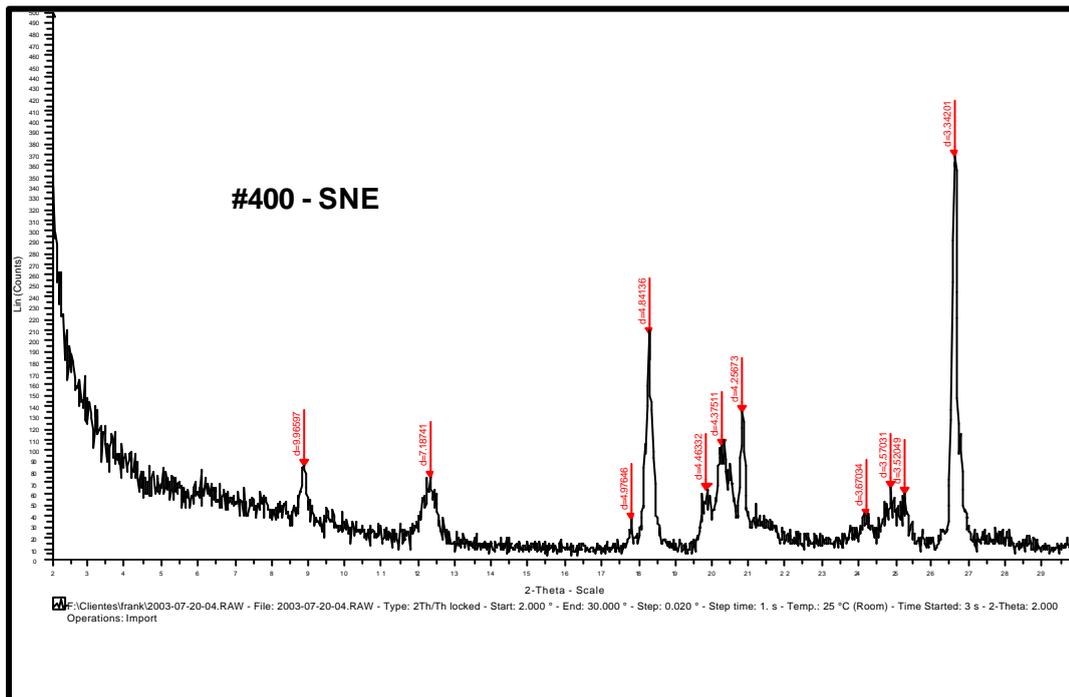
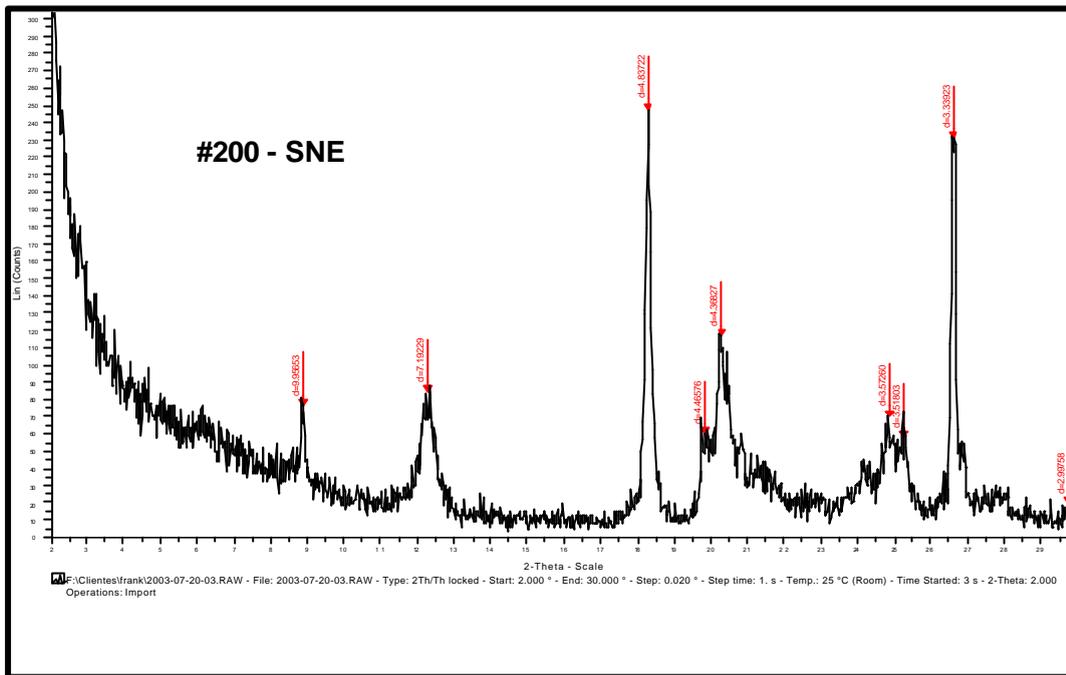
As condições de análise dos resultados constam dos difratogramas, e as composições mineralógicas das duas frações, por serem semelhantes, encontram-se representadas na Tabela 5.16.

Tabela 5.16 – Análise Mineralógica pela difração de Raios -X

Amostras	Fração (Silte + Argila)
SNE	Ilita, Caulinita, Gibbsita ⁺⁺ , Quartzo, Feldspato
SE	Quartzo ⁺⁺ , Mica ⁺⁺ , Caulinita
SC	Mica ⁺⁺ , Quartzo ⁺⁺ , Caulinita ⁺ , Feldspato, Hematita
SRM	Mica / Ilita ⁺ , Caulinita ⁺ , Quartzo, Feldspato
SRJ-A	Mica / Ilita ⁺⁺ , Caulinita ⁺ , Quartzo, Feldspato
SRJ-B	Mica / Ilita ⁺⁺ , Caulinita ⁺⁺ , Quartzo, Feldspato

(++) - dominante

Analisando-se os resultados constantes da Tabela 5.15, obtidos a partir de uma avaliação semiquantitativa dos solos estudados, com base nos valores de d (distância interplanar basal) de cada mineral presente nos difratogramas (Figuras 5.40 a 5.42), verifica-se a presença dominante dos minerais argílicos e mica em todos os solos estudados, com exceção de mica na estrutura do solo não erodido e pelo aparecimento da gibbsita, como um mineral dominante na estrutura deste solo.



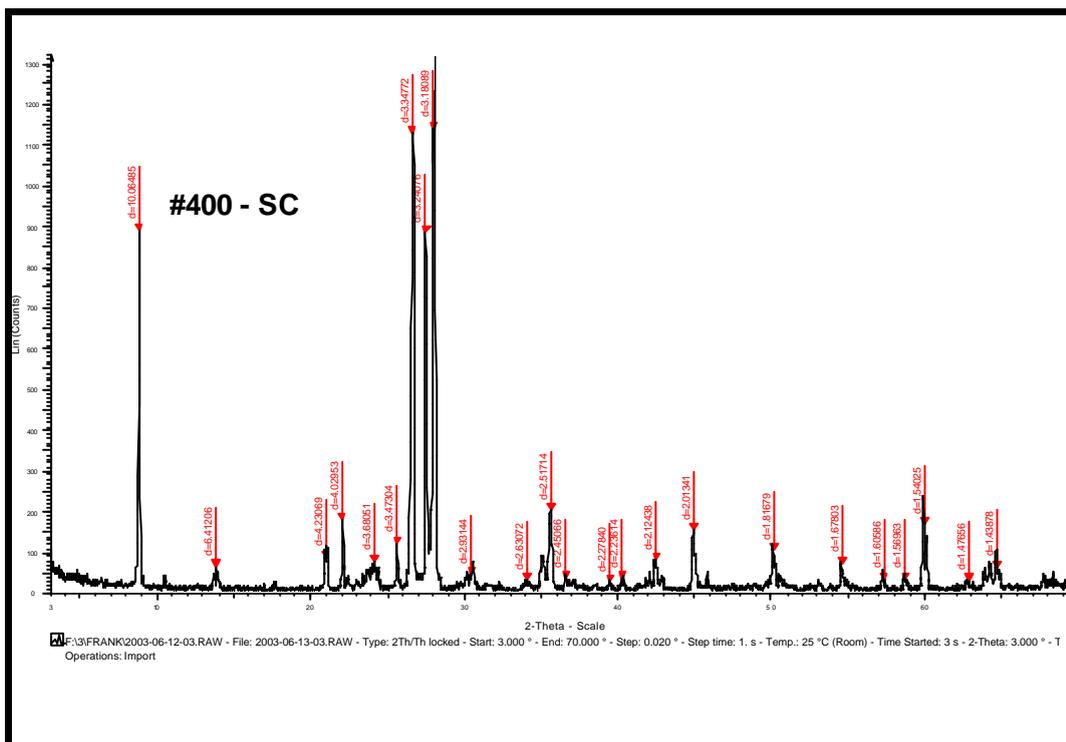
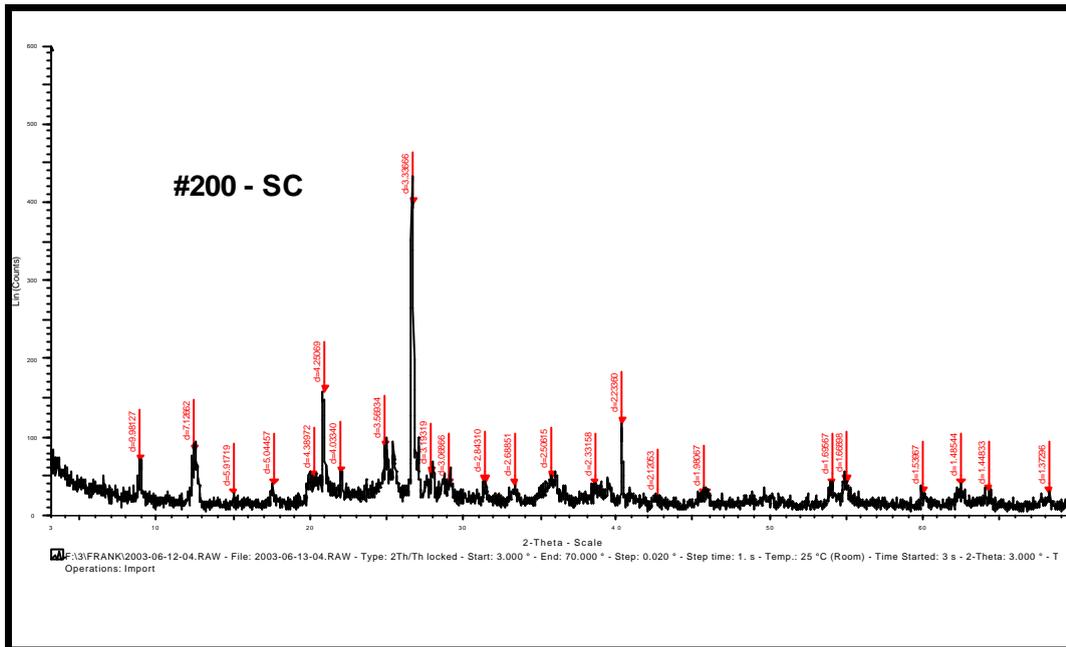
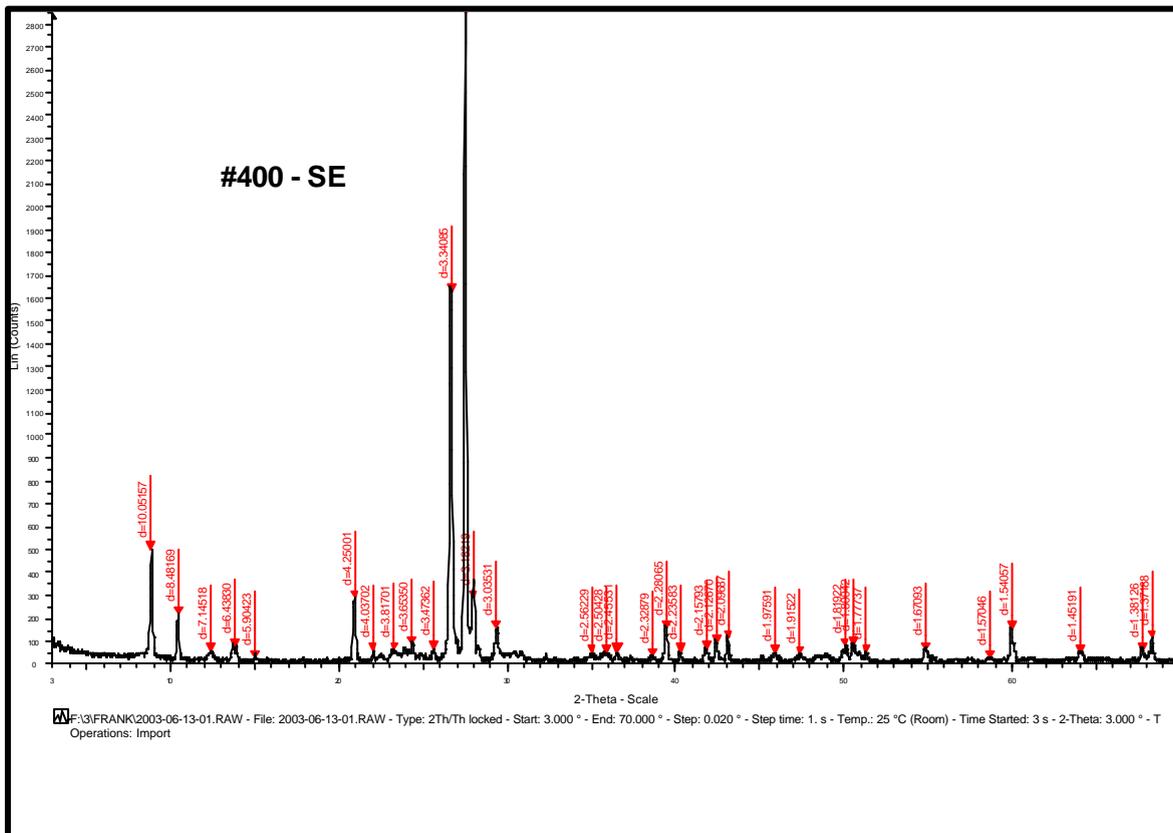
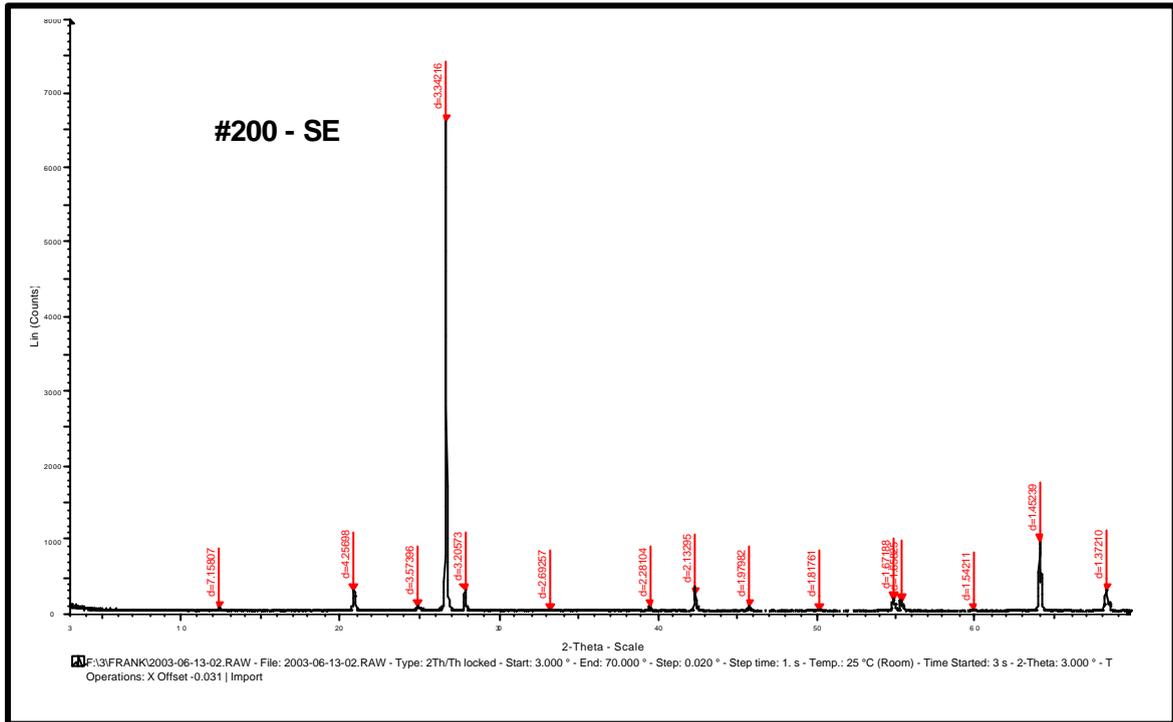


Figura 5.42 – Difratogramas de Raios-X (SNE e SC)



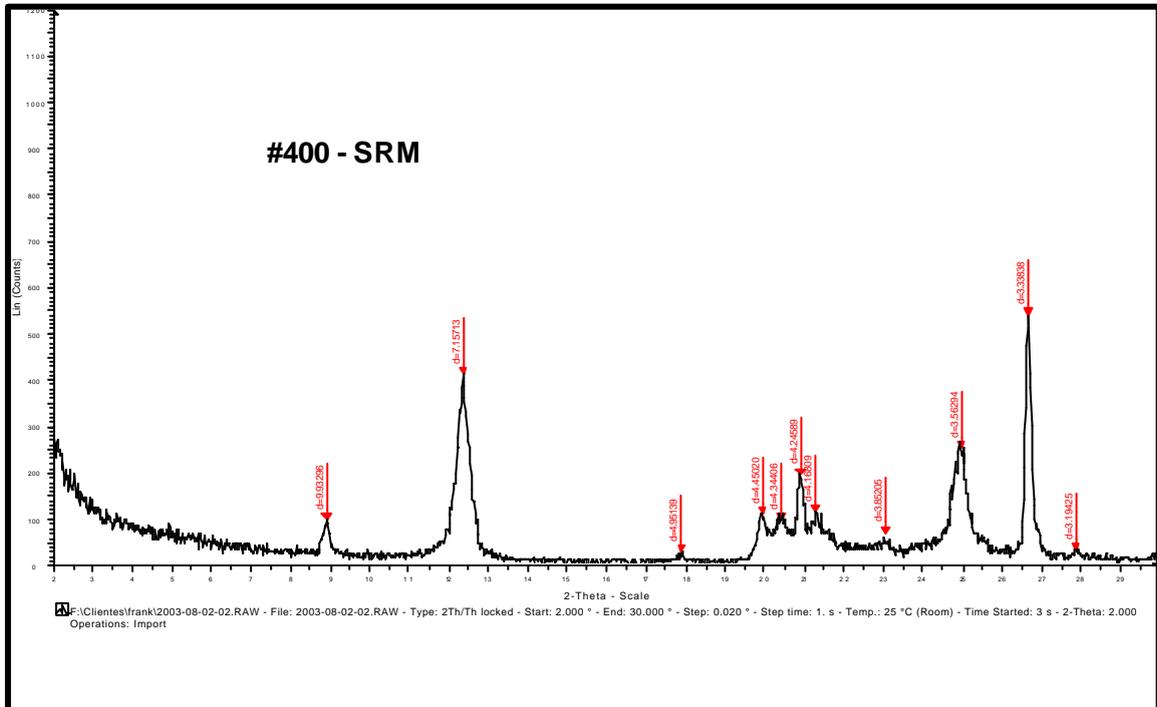
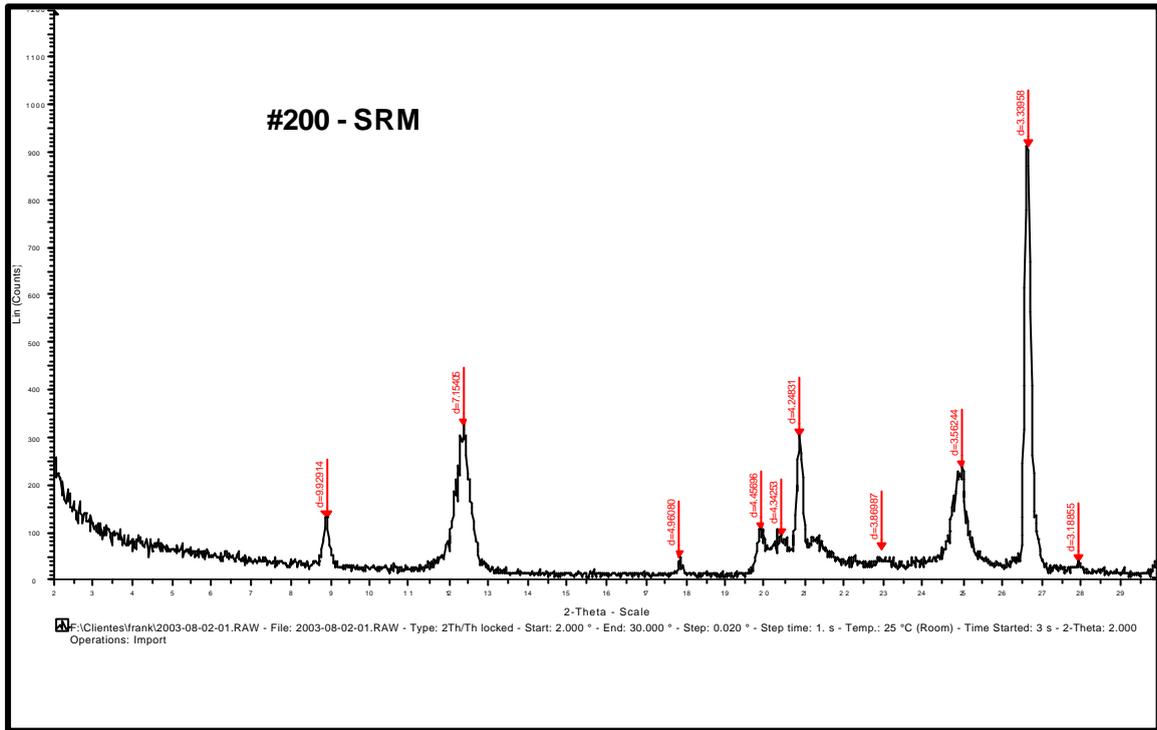
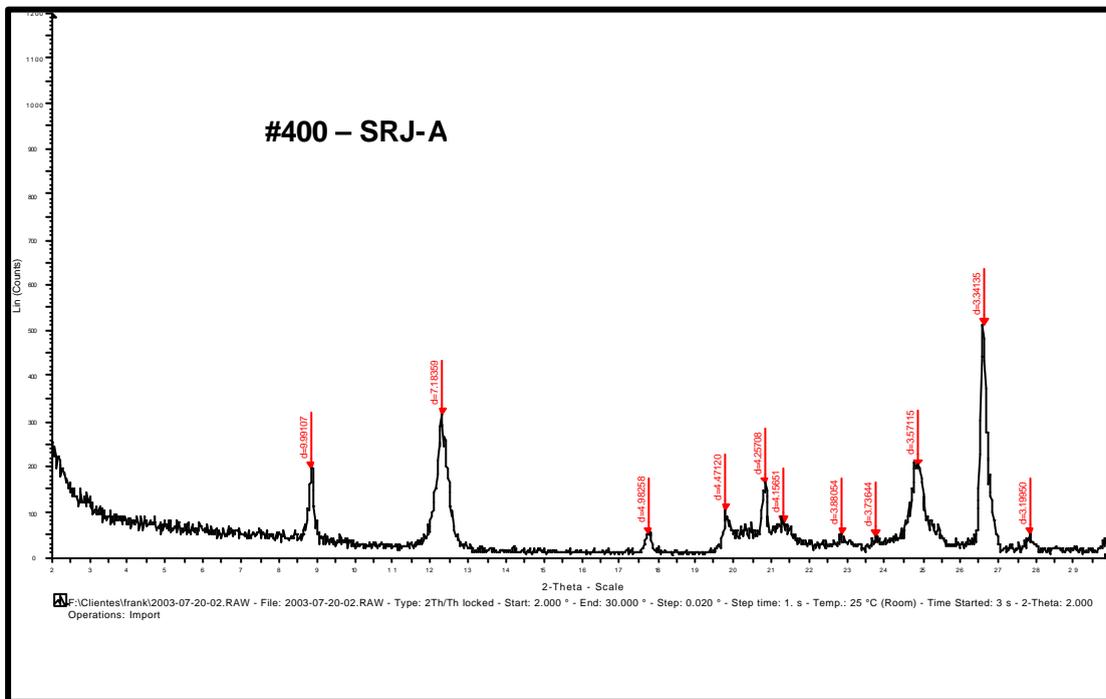
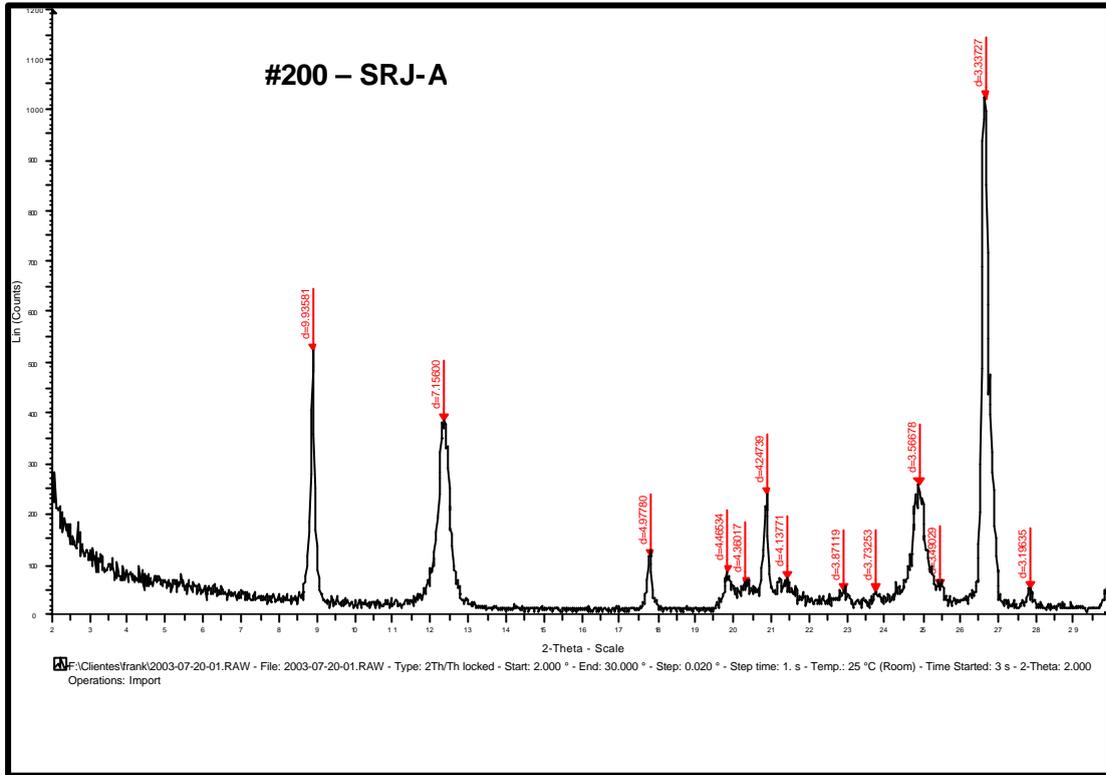


Figura 5.43 – Difractogramas de Raios-X (SE e SRM)



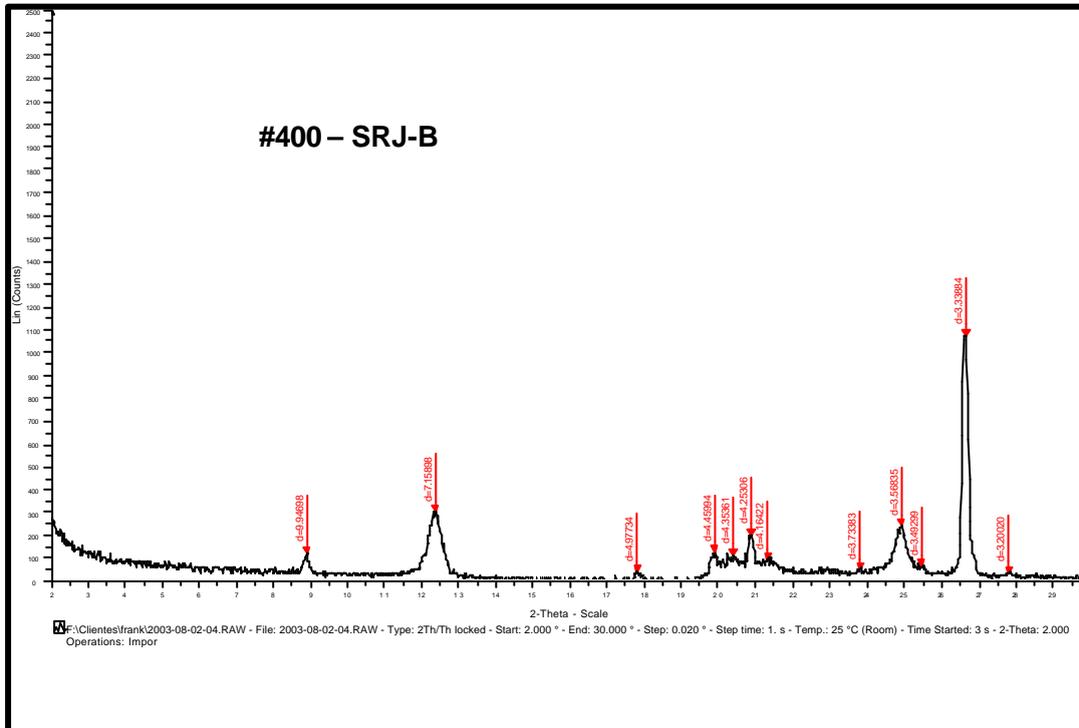
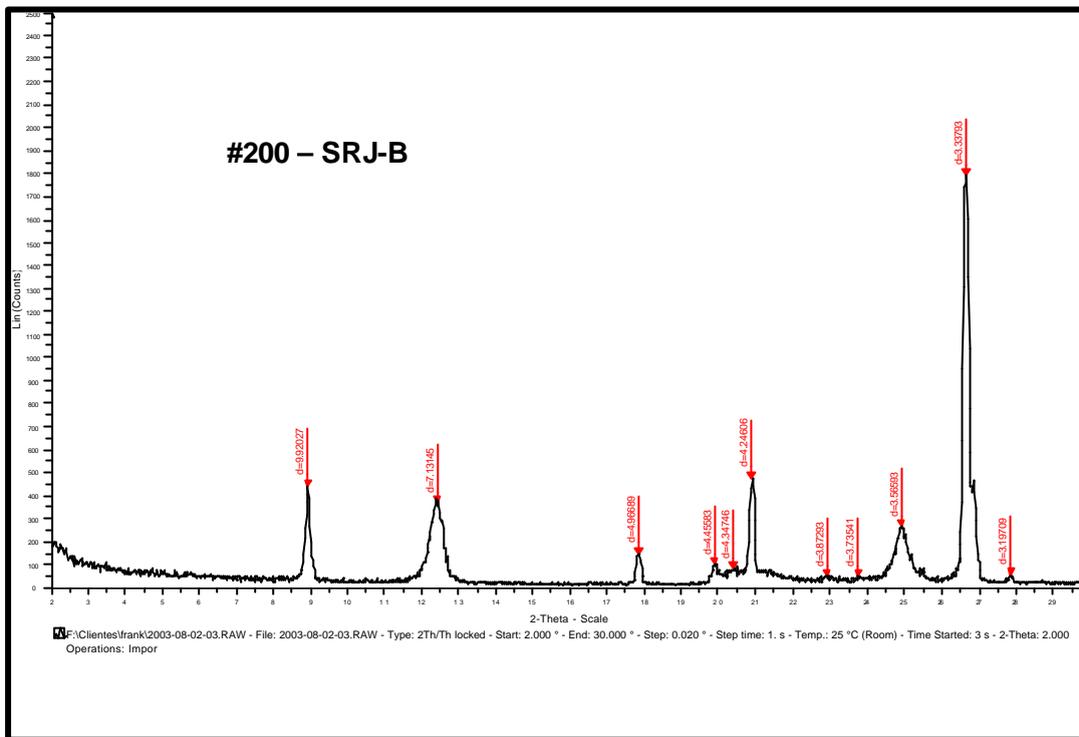


Figura 5.44 – Difractogramas de Raios-X (SRJ-A e SRJB)

Apesar de terem sido obtidos dados semiquantitativos para a análise em questão, a difratometria de raios-x, fornece dados importantes com relação à gênese do perfil de intemperismo, sua variação em função da profundidade e de suas características morfológicas e físicas.

Conclui-se que a classificação desses solos quanto ao mecanismo de erosão atuante, mediante a identificação dos argilominerais presentes em sua estrutura, fornecem parâmetros necessários ao esclarecimento do desenvolvimento desses processos erosivos.

5.5.3. Ensaio de Caracterização MCT (mini-MCV)

O sistema de classificação para solos tropicais MCT (Miniatura, Compactada Tropical) proposto por Nogami e Villibor (1981), veio a partir da verificação pelos autores, das limitações geotécnicas tradicionais a que esses solos estão sujeitos.

Essa nova classificação para os solos tropicais separa o solo, em 7 (sete) grupos e em 2 (duas) grandes classes, conforme apresentado pelo ábaco classificatório dos solos pela metodologia MCT (Figura 5.48).

Inicialmente desenvolvida para estudos rodoviários, essa metodologia passou a ser utilizada para outros fins, como o ensaio de compactação do procedimento de mini-MCV (Moisture Condition Value), que é uma adaptação daquela desenvolvida por Parsons (1976) do “Transport and Road Research Laboratory” da Grã-Bretanha, e do ensaio de perda de massa por imersão em água, sendo este último parte integrante da metodologia (Nogami e Villibor, 1995), representado esquematicamente na Figura 5.45, que em conjunto permitem distinguir os solos de comportamento laterítico dos solos de comportamento não laterítico.

- **Metodologia**

Para o ensaio preconizado pela Norma Técnica, DNER – ME 258/94, utilizou-se amostras dos solos estudados, que foram previamente secas ao ar e passadas na peneira de # 2,00mm de abertura, rejeitando-se a fração retida na mesma, sendo em seguida preparadas porções com diversos teores de umidade.

- **Ensaio de compactação segundo mini-MCV (Moisture Condition Value)**

Nesse ensaio, utilizou-se equipamento de compactação miniatura, com um dispositivo que permite determinar a altura do corpo de prova compactado com resolução de 0,01mm, através da medida da posição da haste do soquete, referente a um ponto determinado que pesa 2270 g e tem como altura de queda 305mm, sendo o diâmetro interno do molde igual a 50mm (Figura 5.45).

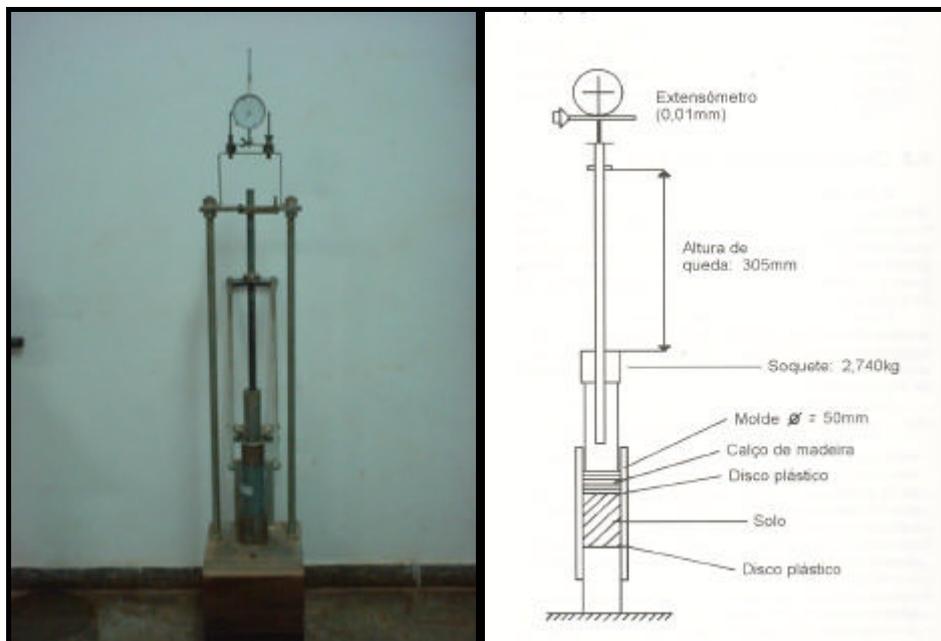


Figura 5.45 – Aparelho com Ensaio de Classificação MCT em andamento e esquema representativo

Dependendo do tipo de solo, o molde é preenchido com uma quantidade de material que varia de 200 a 220g, sendo determinado o teor de umidade (w_i), para cada amostra ensaiada. Em seguida, aplica sucessivos golpes, registrando-se as medidas de alturas (A_i) do corpo de prova correspondente, conforme a série proposta pela norma DNER-ME 258/94, que no subitem 8.8.3, define a seguinte série de golpes: 2,3,4,6,12,16,.....n, n+1,..... 4n interrompendo-se o processo quando:

- a) a diferença entre a “leitura” obtida após 4n golpes e a obtida após n golpes for menor que 2mm;
- b) houver intensa exsudação de água, no topo e na base do corpo de prova;
- c) o número de golpes atingir 256, ou excepcionalmente 64, quando o teor de umidade for muito baixo.

A obtenção da curva característica para cada teor de umidade, parte do valor “a” em ordenada, obtido pela diferença de altura ($A_n - A_{4n}$), onde A_n é a altura do corpo de prova após o número de golpes n, e A_{4n} a altura do corpo de prova após 4n golpes, em abcissa pelo número de golpes n em escala logarítmica.

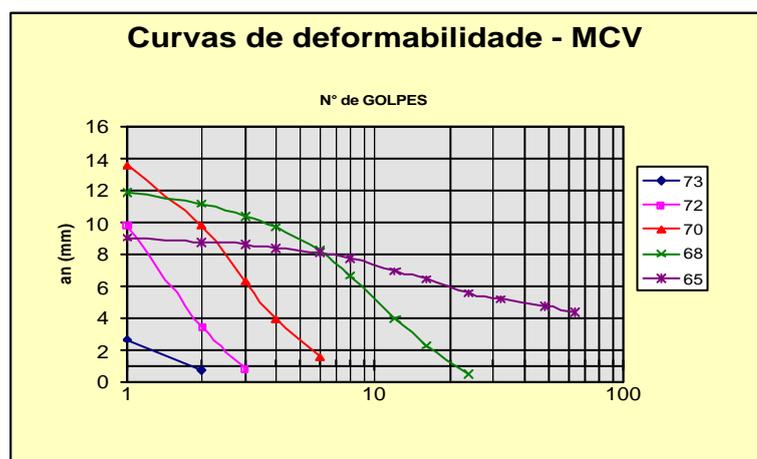


Figura 5.46 – Exemplo de curvas de deformabilidade - MCV

A interseção de cada uma dessas curvas com a reta de ordenada $a_n=2\text{mm}$ determina um valor n_i (número de golpes), correspondente a um teor de umidade (w_i).

O mini-MCV é definido pelo valor $10 \log n_i$, onde o \log é o logaritmo de base decimal e n_i é o número de golpes que resulta na interseção da curva mini-MCV com a reta de ordenada $a_n=2\text{mm}$, havendo um mini-MCV para cada teor de umidade de compactação. O coeficiente c' é determinado pela inclinação da parte retilínea da curva que define o mini-MCV=10.

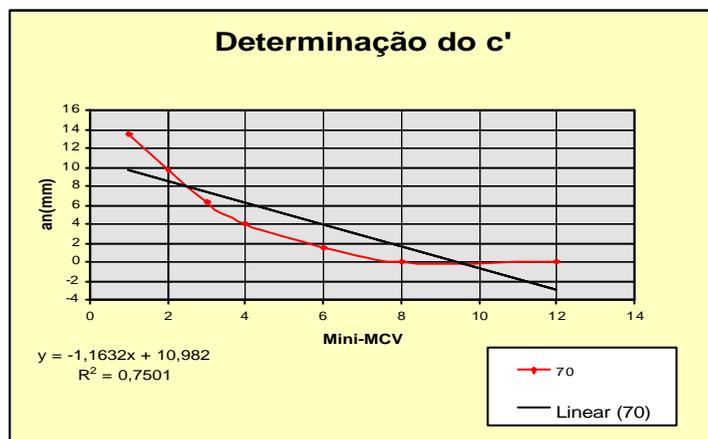


Figura 5.47 – Exemplo de Curva para determinação de c'

Determinados os valores do teor de umidade e da altura dos corpos de prova, obtêm-se as densidades aparentes secas inerentes a cada número de golpes e, a partir desses dados, a curva de compactação correspondente (Figura 5.47). A indicação da parte retilínea do ramo seco da curva, correspondente a 12 golpes é responsável pelo fornecimento do parâmetro d' , representado pela equação a seguir:

$$d' = 1000 \cdot \Delta \text{Das} / \Delta w \quad (3)$$

Onde ΔDas é igual à diferença de densidade aparente seca correspondente a uma variação de teor de umidade Δw .

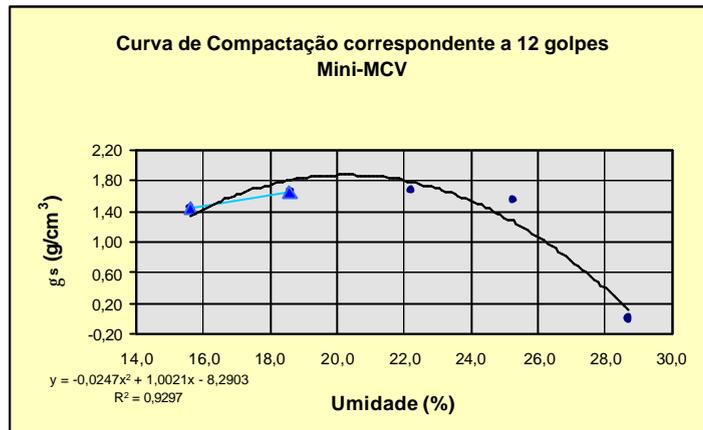


Figura 5.48 – Exemplo de Curva de Compactação para determinação de d'

- **Ensaio de Perda de Massa por Imersão de Solos Compactados**

Esse ensaio, preconizado pela norma técnica, DNER-ME 256/94, utiliza corpos de prova resultantes da compactação, segundo o método mini-MCV. Sendo assim, os corpos de prova são submetidos a um deslocamento axial, em relação ao eixo longitudinal do cilindro, de forma a ficarem 10mm para fora do corpo do mesmo (Figura 5.49).

Em seguida, coloca horizontalmente os moldes cilíndricos contendo as amostras em um recipiente com água, de forma a emergi-las completamente. Sendo o material saliente eventualmente desprendido, recolhido e seco em estufa, com temperatura variando entre 105 e 110°C a fim de se obter o peso seco desprendido de cada corpo de prova.

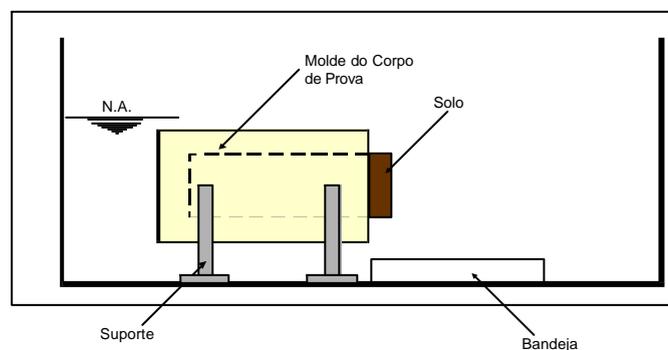


Figura 5.49 – Representação Esquemática do Ensaio de Perda de solo por Imersão

Dessa forma a perda de solo por imersão “Pi” é obtida pela equação a seguir:

$$P_i = 10 M_d \cdot a / M_s \quad (5)$$

onde (**Md**) é a massa seca da parte desprendida expressa em gramas e (**Ms**) a massa seca em estufa do corpo de prova obtida pela fórmula: **Ms = 100·Mu/100+w_c**, onde **Mu** é a massa úmida do corpo de prova expressa em gramas e w_c o teor de umidade de compactação expresso em porcentagem. Sendo a perda de massa por imersão, obtida por cálculo para cada corpo de prova, devendo-se observar que, quando a parte desprendida preserva a forma cilíndrica, sem deformações apreciáveis o valor de **Md** deve ser multiplicado pelo fator de redução a=0,5.

Partindo-se de um gráfico (Pi x mini-MCV) de cada corpo de prova, encontra-se o valor de Pi correspondente ao mini-MCV = 10 ou 15, que será utilizado na classificação do solo estudado em função da altura final do corpo de prova se menor ou maior que 53mm, sendo o valor da massa específica aparente úmida, considerado baixo ou alto em função de um maior ou menor valor da altura estabelecida para amostras submetidas a esse ensaio. A partir dos valores de Pi e d', calcula-se o coeficiente e', dado pela fórmula:

$$e' = \sqrt[3]{\frac{20/d' + P_i/100}{1}} \quad (6)$$

Obtidos os valores de c' e e', classifica-se o solo a partir do ábaco proposto pelos autores (Figura 5.50). Sendo apontadas na Tabela 5.17, as tendências de comportamento da erosão dos solos representativos dos diversos grupos, de acordo com as condições físicas de São Paulo (modificado por Nogami e Villibor, 1995).

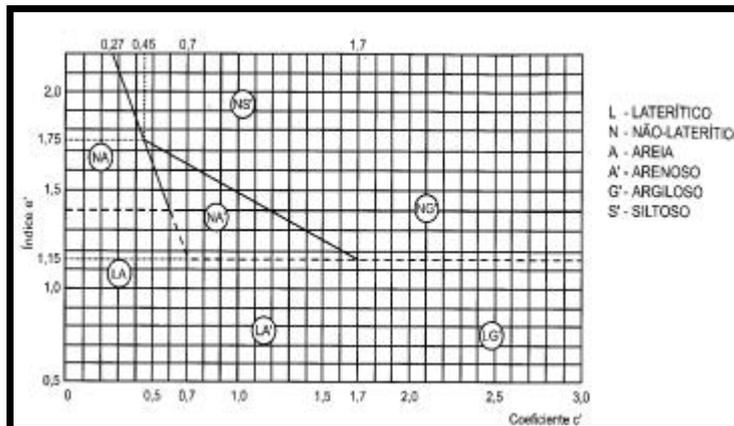


Figura 5.50 – Âbaco classificatório dos solos pela metodologia MCT

Tabela 5.17 – Quadro característico de solos dos grupos MCT, quanto à erodibilidade hídrica e propriedades de interesse à sua previsão (condições típicas do Estado de São Paulo) – modificado por Nogami e Villibor, 1995

Grupo MCT		NA	NA'	NS'	NG'	LA	LA'	LG'
Resist. Agreg. ou Torrões (1)		N	N	N, B, M, E, (2)	B	B	B	B
Coef. Sorção	Natural	E/M/B	B/M/E	E/M, E	B	E	E/B,E	M,E
	Compactado	E	B,M	E	M, E	B	B	B
Perda de Massa por imersão	Natural (3)	E	B/E,M	B,M, E	M, E	E,M	B,M	B
	Compactado	E	E,M	E	B,M	E	N/B,M	N,B
Erosão em valetas não revestidas	Natural	E	E	B,M, E	B,M	E	E	M, E
	Compactado	E	E,M	E	B,M	M, E	B	B
Erosão em cortes solos "in situ" (4)	Erodibilidade	B,M, E	B,M, E	B,M, E	M, E	B	B	B
	Formas	desag. E	desag. M	Sulcos E	Sulcos desag. E	firme	desag. B	desag. E
Erosão em saias de aterros	Solto	E	E	B,M, E	M, E	E	M	B
	Compactado	E	E	E	M, E	E	M, E	M
Abreviaturas: N-nulo(a); B-baixo(a); M-médio(a); E-elevado(a); desag.- desagregações / - freqüência decrescente; , - freqüência equivalente								

- (1) Resistência dos agregados ou torrões, naturais ou produzidos por escavação do solo natural (não-compactado), à imersão em água;
- (2) Apenas torrões resultantes da escavação do solo natural (não-compactado);
- (3) Determinada em corpos de prova não deformados ou pouco deformados, de altura igual à metade do diâmetro;
- (4) Apenas taludes de solos isotrópicos e homogêneos, em condições naturais, com inclinações entre 45° e 60°, nas condições climáticas prevalentes no planalto paulista, com exclusão de áreas serranas.

- **Análise dos resultados**

Os resultados referentes aos ensaios de compactação e de perda de massa por imersão de solos compactados da forma mini-MCV estão representados nas Figuras 5.51 a 5.54, sendo os dados referentes a esses ensaios, constantes das Tabelas 5.18 a 5.21.

Para os quatro tipos de solos estudados, foram coletadas 05 (cinco) amostras, de cada um, as quais apresentaram os seguintes resultados:

a) Solo Coluvionar (SC)

Tabela 5.18 – Valores para classificação mini-MCV do Solo Coluvionar

DETERMINAÇÃO DA PERDA DE MASSA POR IMERSÃO DE SOLOS COMPACTADOS – mini-MCV						
Determinação da massa seca desprendida						
Cilindro de compactação	n°	19	73	72	70	68
Cápsula	n°	G220	G128	G191	G170	G07
Massa seca + Tara	(g)	103,81	83,59	81,96	67,68	66,82
Tara	(g)	48,03	48,73	49,64	45,37	49,05
Massa seca desprendida - Md	(g)	55,78	34,86	32,32	22,31	17,77
Fator de Redução- a = 0,5		-	-	-	0,5	-
Perda de Massa por Imersão - PI PI=10 x Md x a / Ms (%)		202,4	118,9	105,0	34,1	50,7

$$e' = \sqrt[3]{\frac{Pi}{100} + \frac{20}{d'}}$$

Dados para classificação do solo		
c' =	1,5	d' = 31,25 e' = 1
Pi =	34	Classificação mini-MCV = LA/LG'

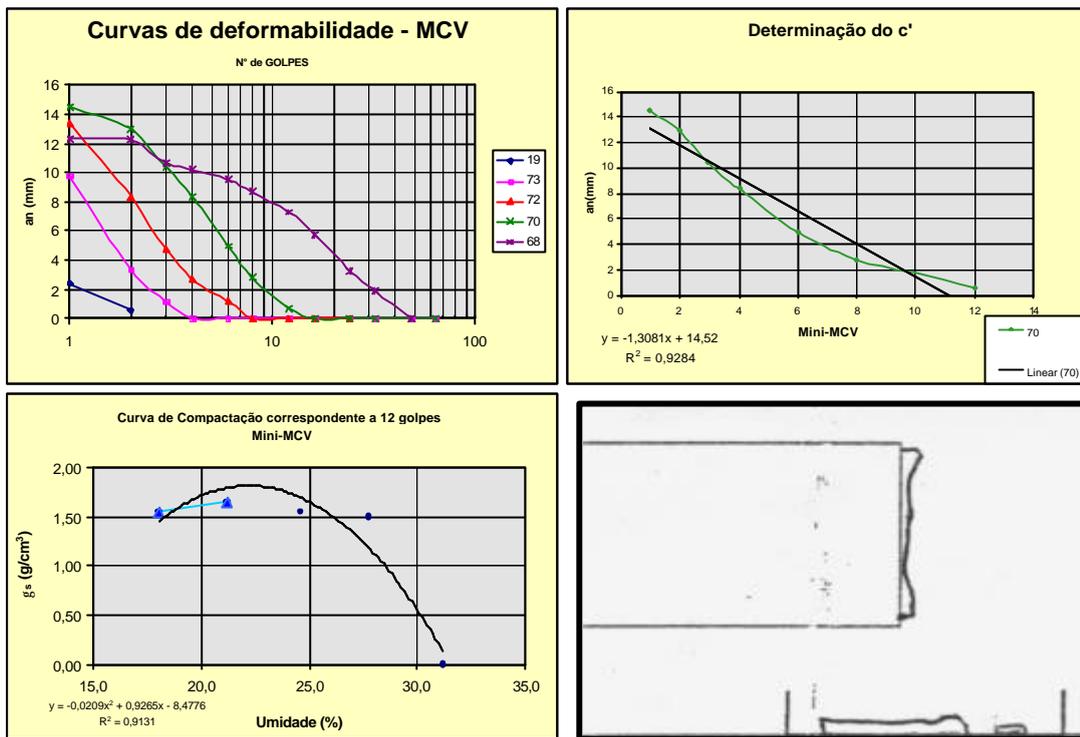


Figura 5.51 – Gráficos e representação esquemática do ensaio mini-MCV (SC)

Com os valores encontrados para c' e e' , Tabela 5.18, plotados no ábaco para obtenção de classificação de solos pela metodologia MCT (mini-MCV), Figura 5.50, constata-se que o solo situa-se no limite entre a zona LA' (solo laterítico arenoso) e LG' (solo laterítico argiloso), o que indica estar o solo em uma zona de transição, qual seja, passando de um estado mais argiloso para um mais arenoso, ou vice-versa, podendo esta característica física, ser confirmada pelo ensaio de caracterização deste solo, Tabela 5.1, que indica uma maior predominância da fração argila, seguida das frações silte e areia, podendo o solo ser classificado como sendo argilo-arenoso a areno-siltoso, de coloração marrom a marrom avermelhada.

O ensaio de perda de massa por imersão, cujos valores constam da Tabela 5.18 e que junto ao modelo esquemático representativo da perda de solo, Figura 5.51, ajudam na interpretação e enquadramento deste solo, quanto à susceptibilidade a sofrer uma maior ou menor resistência a processos

erosivos. A Tabela 5.17, confirma o enquadramento deste solo quanto a perda de massa por imersão devido a erodibilidade hídrica, como sendo de nula a baixa, estando essa característica condizente com os padrões de classificação para solos lateríticos, que apresentam uma maior resistência a processos erosivos se comparado a outras gêneses de solos submetidas às mesmas condições deste ensaio. Outro fato que vem a confirmar a classificação deste solo como laterítico, além das observações de campo, são os ensaios de Inderbitzen, Desagregação e Mineralógico que juntos confirmam ser este solo menos sujeito a sofrer processos erosivos, dentre os outros solos analisados.

Pelas características inerentes a este solo, pode-se atribuir a sua resistência a processos erosivos, a presença de argilominerais presentes na sua estrutura, que funcionam como elemento cimentante das partículas sólidas que compõem o seu esqueleto, preservando dessa forma, as características físico-químicas inerentes a ele.

b) Solo Residual Maduro (SRM)

Tabela 5.19 – Valores para classificação mini-MCV do Solo Maduro

DETERMINAÇÃO DA PERDA DE MASSA POR IMERSÃO DE SOLOS COMPACTADOS – mini MCV						
Determinação da massa seca desprendida						
Cilindro de compactação	n°	73	72	70	68	65
Cápsula	n°	G105	G147	G198	G216	G42
Massa seca + Tara	(g)	122,54	128,23	133,80	149,2	157,78
Tara	(g)	48,20	52,44	45,73	50,14	49,2
Massa seca desprendida - Md (g)		74,34	75,79	88,07	99,06	108,58
Fator de Redução – a = 0,5		-	-	-	-	-
Perda de Massa Por Imersão – PI PI=10 x Md x a / Ms (%)		283,6	269,5	288,9	300,1	327,1

$$e' = \sqrt[3]{\frac{Pi}{100} + \frac{20}{d'}}$$

Dados para classificação do solo		
c' =	1,2	d' = 3,92
PI =	282	e' = 1,99
Classificação mini-MCV =		NS'

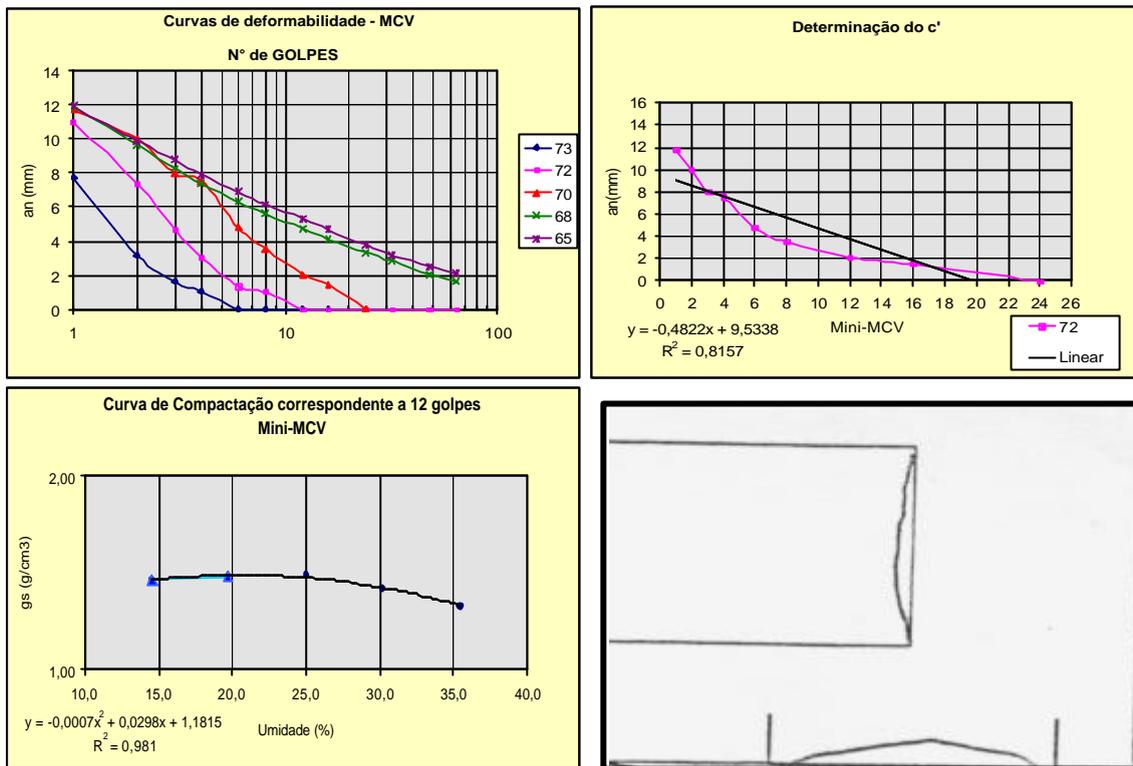


Figura 5.52 – Gráficos e representação esquemática do ensaio mini-MCV (SRM)

Os valores obtidos c' e e' , Tabela 5.19 e Figura 5.52, após plotados no ábaco para classificação de solos pela metodologia MCT (Figura 5.50), enquadram este na zona NS' , portanto classificando-o como Solo Não Laterítico Siltoso, Entrando, com essa classificação na Tabela 5.19, que caracteriza os solos dos grupos MCT, quanto a erodibilidade hídrica e as propriedades de interesse à sua previsão, conclui-se como sendo elevada a perda de massa por imersão para a amostra de solo. Portanto, solo este que apresenta uma maior tendência a sofrer processos erosivos.

No ensaio de Caracterização, este solo foi o que apresentou a maior fração silte, dentre os outros solos analisados, e se correlacionado com os ensaios de Inderbitzen, Desagregação e Pinhole Test, este aparece como sendo o solo mais erodível, dentre os demais solos estudados.

• Solo Residual Jovem A (SRJ-A)

Tabela 5.20 – Valores para classificação mini-MCV do Solo Residual Jovem A

DETERMINAÇÃO DA PERDA DE MASSA POR IMERSÃO DE SOLOS COMPACTADOS - mini MCV						
Determinação da massa seca despreendida						
Cilindro de compactação	nº	73	70	72	68	65
Cápsula	nº	G197	G33	G92	G62	G202
Massa seca + Tara	(g)	142,9	146,1	155,6	158,42	165,14
Tara	(g)	47,36	48,09	51,72	48,56	46,62
Massa seca despreendida - Md (g)		95,54	34,86	103,88	109,86	118,52
Fator de Redução – a = 0,5		-	-	-	-	-
Perda de Massa Por Imersão - PI PI=10 x Md x a / Ms (%)		365,9	122,5	341,2	331,6	339,3

$$e' = \sqrt[3]{\frac{Pi}{100} + \frac{20}{d'}}$$

Dados para classificação do solo		
c' =	0,8	d' = 1,89
ei =	337	Classificação mini-MCV = NS'

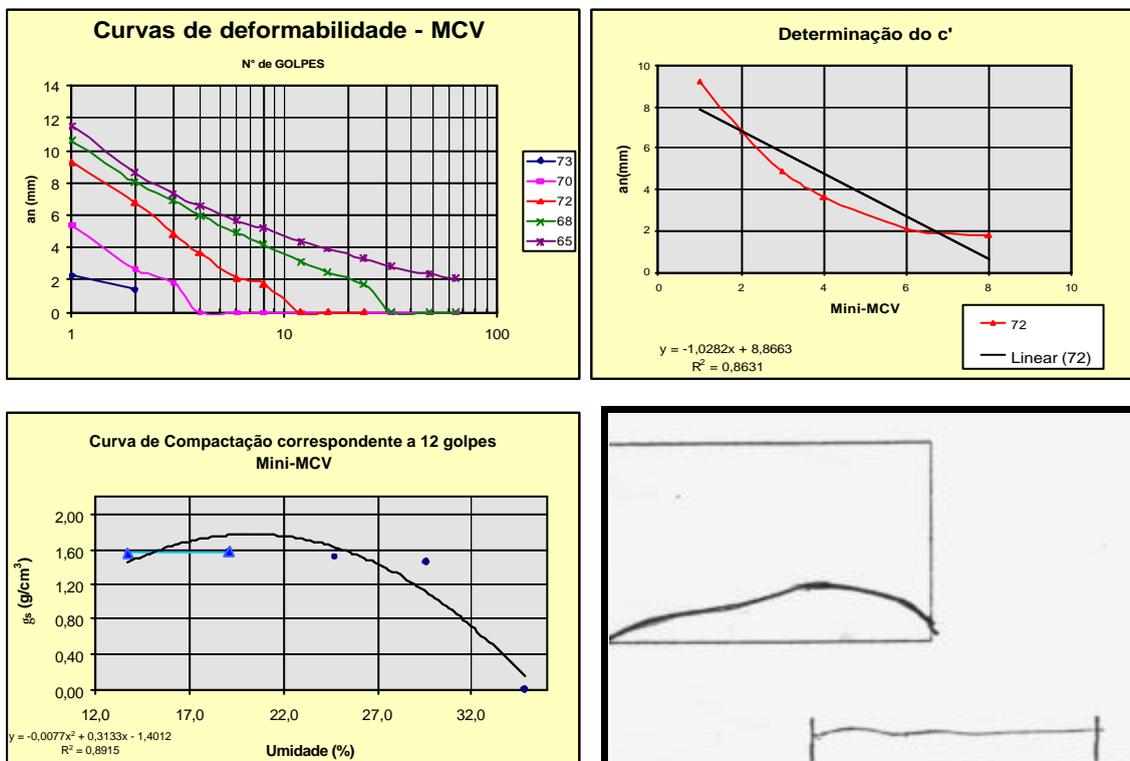


Figura 5.53 – Gráficos e representação esquemática do ensaio mini-MCV (SRJ-A)

Os valores de c' e e' constantes da tabela acima quando plotados no ábaco para classificação de solos pela metodologia MCT, Figura 5.50, constata-se estar este solo na zona NS', portanto sendo ele classificado como Solo Não-Laterítico siltoso, sendo o seu valor de perda de massa por imersão quanto a erodibilidade hídrica, Tabela 5.17, considerado elevado, estando este dentro dos padrões de classificação para Solos Não-Lateríticos, apresentando uma menor resistência a processos erosivos.

Correlacionando este ensaio com o de Inderbitzen e desagregação, conclui-se ser este solo o segundo em grau de erodibilidade, dentre os solos analisados.

- **Solo Residual Jovem B (SRJ-B)**

Tabela 5.21 – Valores para classificação mini-MCV do Solo Residual Jovem B

DETERMINAÇÃO DA PERDA DE MASSA POR IMERSÃO DE SOLOS COMPACTADOS - mini MCV						
Determinação da massa seca desprendida						
Cilindro de compactação	Nº	73	72	70	68	65
Cápsula	Nº	G13	G88	G61	G225	G79
Massa seca + Tara	(g)	128,83	134,98	144,82	154,36	159,7
Tara	(g)	49,8	49,05	49,51	49,74	48,49
Massa seca desprendida – Md	(g)	79,03	85,93	95,31	104,62	111,21
Fator de Correção – a = 0,5		-	-	-	-	-
Perda de Massa Por Imersão - PI PI=10 x Md x a / Ms (%)		274,5	279,3	286,0	290,2	308,1

$$e' = \sqrt[3]{\frac{Pi}{100} + \frac{20}{d'}}$$

Dados para classificação do solo		
$c' =$	1	$d' =$ 1,96
$e' =$	2,4	
PI =	286	Classificação mini-MCV = NS'

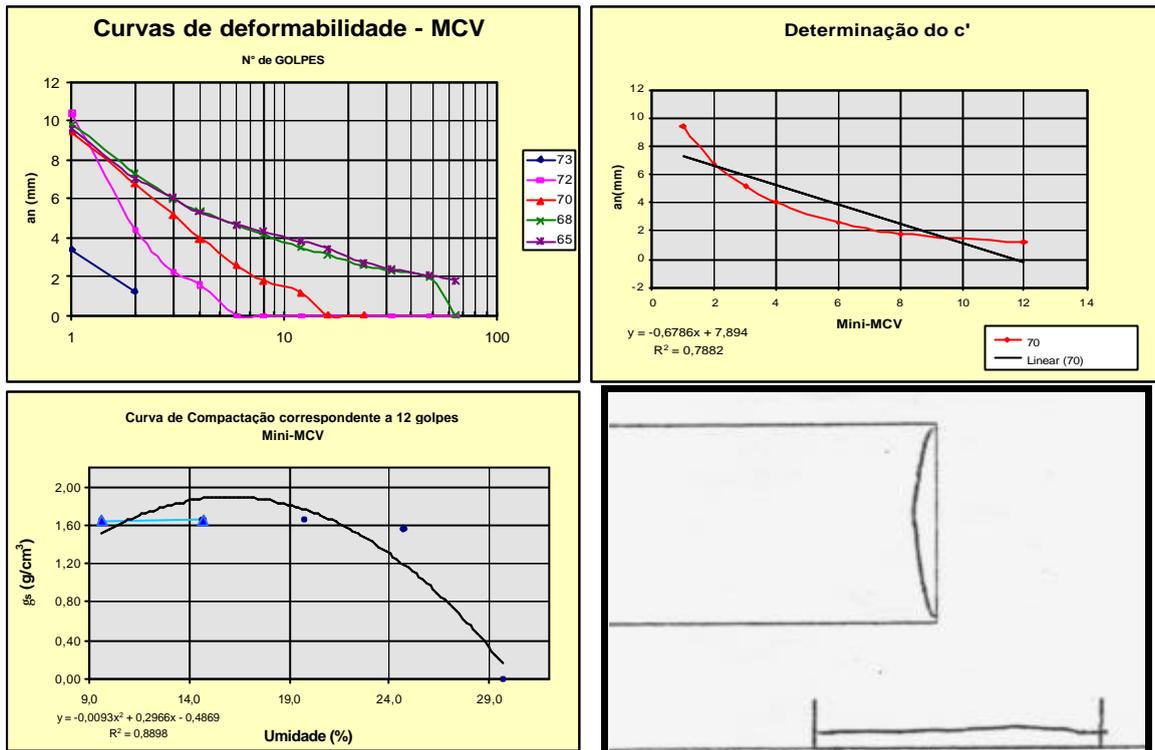


Figura 5.54 – Gráficos e representação esquemática do ensaio mini-MCV (SRJ-B)

Para o Solo Residual Jovem B, os valores de c' e e' , constantes da Tabela 5.21 e representados na Figura 5.54, após serem analisados e plotados no ábaco para classificação de solos pela metodologia MCT, Figura 5.50, enquadraram este solo na zona NS', portanto classificando-o como sendo um solo não laterítico siltoso. Entrando-se com essa classificação na Tabela 5.17, que caracteriza os solos do grupo MCT, quanto à ocorrência de perda de massa por imersão para amostra compactada e erodibilidade hídrica e as propriedades de interesse à sua previsão, conclui-se como sendo elevada para o solo estudado.

Correlacionando-se este ensaio com os ensaios de Inderbitzen e Desagregação, conclui-se ser o solo, o terceiro em grau decrescente de erodibilidade, na classificação geral dos solos estudados.

5.5.4. Ensaio de sucção (curva característica)

Em geral os espaços entre as partículas de um solo são normalmente preenchidos por uma quantidade de ar e água. De acordo com Marinho (1994), quando a água está presente apenas nos poros menores, o solo é denominado não saturado sendo a pressão da água do solo, abaixo da pressão atmosférica, denominada de sucção. Embora a sucção esteja intimamente ligada aos solos não saturados, ela também pode ocorrer, em valores elevados nos solos saturados.

A sucção é normalmente dividida em duas componentes, a matricial “relacionada com a matriz do solo, isto é, a combinação do tipo de partícula e seu arranjo estrutural” e a osmótica “devido à composição química da água do solo”. Segundo o mesmo autor, as características mecânicas nos solos não saturados :

“São controladas, entre outras coisas, pela pressão (relativa) negativa que se desenvolve na água intersticial, devido a capilaridade e as forças de adsorção. Esta pressão é determinada pela diferença entre a pressão atmosférica ou pressão do ar, e a pressão na água, sucção natural”.

- **Metodologia**

Para se obter uma melhor avaliação dos solos estudados, optou-se pela realização desse ensaio, utilizando-se os métodos do papel filtro (umedecimento e secagem) e Panela de Richard (secagem), ambos por permitirem que o fluxo de água ocorra através de fluxo capilar, onde no primeiro caso poderá ocorrer fluxo de vapor, sendo a sucção medida a total⁸, enquanto que para o segundo, a sucção encontrada é a matricial.

⁸ A sucção total é obtida utilizando-se um disco de plástico perfurado separando o papel filtro do solo. O espaço de ar formado entre o papel filtro e o solo estabelecem uma barreira para os sais, permitindo apenas a ocorrência de fluxo de vapor d'água, o que possibilita a determinação da pressão total.

O ensaio de Sucção utilizando-se a técnica do papel filtro foi realizado no laboratório de solos da PUC-Rio, sendo o ensaio com a utilização da Panela de Richards executado no laboratório de solos de Furnas Centrais Elétricas S.A - GO.

A técnica do papel filtro para medição da sucção consiste no princípio de absorção e equilíbrio que existe quando um material poroso com deficiência de umidade é posto em contato com um papel filtro, com umidade menor. O papel passa a absorver uma certa quantidade de água do solo até que o sistema entre em equilíbrio de sucção, sendo que, a sucção obtida depende do tipo de transferência da água do solo para o papel filtro, que pode se dar por capilaridade ou através de vapor, num prazo mínimo de 7 dias.

Marinho (1994) descreve que o papel filtro “ao ser colocado em contato com a água do solo, tanto através de um contato físico ou através do vapor de água, o papel absorve água do solo”. Esta absorção se dá ao longo do tempo até que um equilíbrio de pressão seja atingido. No estado de equilíbrio assume-se que não há fluxo entre o solo e o papel filtro, fornecendo a mesma sucção tanto no solo como no material poroso, porém com umidades diferentes. O tempo de equilíbrio é considerado um fator de extrema importância para obtenção da correta sucção, devendo-se obter nesta fase, no mínimo, duas medidas de sucção por cada amostra do solo estudado.

- **Método do Papel Filtro**

Para o ensaio, optou-se pela utilização do papel filtro da marca Whatman nº 42, sendo o mesmo manipulado diretamente da caixa com luvas cirúrgicas e pinça, ou seja, com umidade higroscópica preservada, adotando-se para aferição do mesmo uma curva de calibração da literatura, mais especificamente, proposta por Chandler et al (1992). Dessa forma, o papel filtro foi colocado diretamente em contato físico com o solo, sendo assim, a sucção

medida foi a matricial, a qual exige, para o ensaio, um tempo de equilíbrio de 10 dias, tempo este, padronizado para todas as amostras.

Utilizou-se como amostra para este ensaio, os blocos indeformados representativos do solo coluvionar (SC), solo residual maduro (SRM), solo residual jovem A (SRJ-A) e do solo residual jovem B (SRJ-B), os quais encontravam-se lacrados com parafina e mantidos em câmara úmida.

De cada amostra de solo, foram extraídos 10 copos de prova, através de cravação de anéis de metal com 50,5mm de diâmetro e 19,8 mm de altura, determinando-se, antes, a massa específica do anel mais solo.



Figura 5.55 – Extração da amostra de solo com anel de metal

Para obtenção da curva característica, foram ensaiados 10 pontos em cada amostra de solo estudada. Sendo os seus valores representados na forma de gráficos.

Para o primeiro ponto ensaiado, foram retirados 150g de solo, para obtenção da umidade natural, decorrente do nivelamento da superfície da

amostra com as bordas do cilindro, tendo sido este pesado, em balança com acurácia de 0,0001g, e distribuído igualmente em 3 cápsulas de alumínio, com capacidade de 50g cada, sendo em seguida levadas a uma estufa com temperatura variando de 100 a 110°C durante o período de 24 horas. Após este período, as cápsulas com os solos foram submetidas a nova pesagem, sendo o percentual de umidade natural do solo, obtido pela diferença entre esses valores.

Com relação ao primeiro anel contendo a amostra de solo extraída dos blocos indeformados, este foi pesado e em seguida, uma de suas faces foi envolvida com papel filtro de mesmo diâmetro.

Os demais pontos foram subdivididos em dois ramos, a saber: o primeiro chamado de ramo molhado, em que o papel filtro foi colocado em contato com uma das faces das amostras de solo obtida do 2º ao 5º ponto, para as quais adotou-se, após a pesagem do anel mais solo, o critério de distribuição proporcional de água destilada, através de uma fonte graduada fazendo-se percolar água sobre uma das faces de cada amostra de solo, aplicando-se a seguir o papel filtro sobre a mesma, deixando-as, em seguida, repousando por um período de 24 horas. Essa distribuição de água, foi feita de forma gradual, sendo que para o 2º ponto utilizou-se 1,0 ml, já para o 3º ponto 2,0 ml, para o 4º ponto 4,0 ml e para o 5º ponto 6,0 ml, finalizando-se esta etapa, as amostras foram pesadas.

O segundo ramo, chamado de ramo seco, adotou-se, após a pesagem do anel mais solo, o critério de secagem natural ao ar, nos períodos de 2 horas para o 6º ponto, 4 horas para o 7º ponto, 8 horas para o 8º ponto, 12 horas para o 9º ponto e 24 horas para o 10º ponto. Sendo que, respeitados os intervalos de tempo, as amostras foram pesadas tendo em seguida uma de suas faces envolvidas com papel filtro.

Após cada procedimento acima descrito, as amostras foram finalmente envolvidas, uma a uma, com duas camadas de filme plásticas, presas ao final com fita adesiva. Sendo estas, em seguida, colocadas em uma caixa de isopor lacrada com fita adesiva, de forma a se garantir um ambiente com pouca variação térmica. O tempo de permanência destas na caixa foi estipulado em 10 dias, tempo esse considerado suficiente para que as amostras atingissem o equilíbrio de sucção (Figura 5.56).

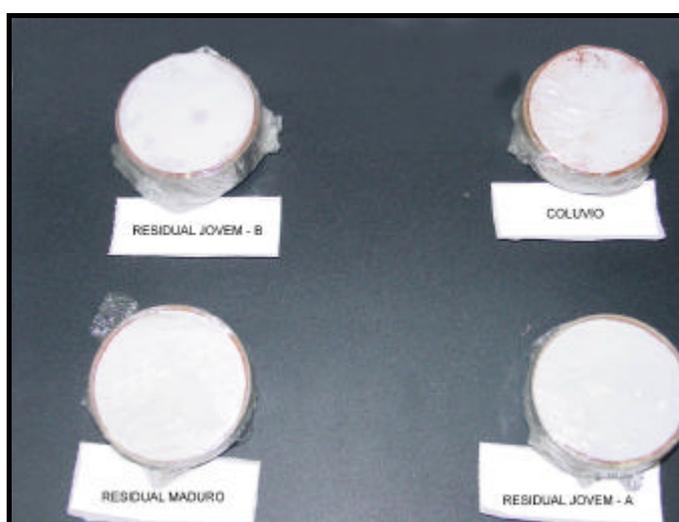


Figura 5.56 – Amostras de solos envolvidos com filmes plásticos

Decorrido o tempo de equilíbrio, os papéis filtro foram retirados das amostras com o uso de uma pinça e colocados em pequenos sacos plásticos auto-selantes, procurando-se atender a recomendação de que essa operação fosse realizada no máximo em cinco segundos, evitando-se assim, a evaporação de água do papel.

Em seguida os sacos plásticos com os papéis úmidos foi pesada em balança, Figura 5.57, sendo que os processos de pesagem tiveram como tempo de duração 3 minutos e, com intervalos a cada 10 segundos.



Figura 5.57 – Balança para pesagem de papel filtro

Concluindo, os papéis filtro são removidos dos sacos plásticos e colocados em cápsulas, sendo estes, secos em estufa a 105°C, por pelo menos duas horas, tempo considerado suficiente por Marinho (1994). Após este tempo determinou-se a massa seca de cada papel filtro, recolocando-os nos respectivos sacos, utilizando-se novamente o tempo máximo de cinco segundos, desta vez, evitando que os papéis absorvessem umidade. Com a diferença de pesos obteve-se a umidade seca do papel filtro e pela calibração desse determinou-se a sua sucção, obtendo-se assim, as curvas características de cada amostra dos solos ensaiados, os quais, foram representados em forma de gráfico cartesianos (Figura 5.58).

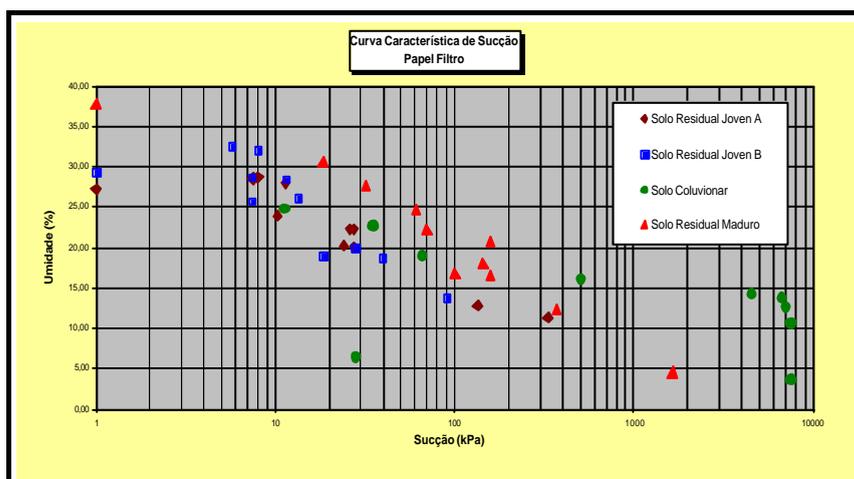


Figura 5.58 – Curvas Características pelo método do Papel Filtro

- **Curva característica - Câmara de Pressão de Richards**

Para determinação da curva característica recorreu-se às mesmas amostras de solos do método anterior, sendo, portanto, utilizado um equipamento denominado Extrator de Umidade de Placa Cerâmica, também conhecido como Câmara de Pressão de Richards (Panela de Richards), pertencente ao laboratório de solos de Furnas Centrais Elétricas S.A. – GO (Figura 5.59)



Figura 5.59 – Câmara de Pressão de Richards

O extrator de umidade de placa cerâmica é do modelo Cat. 1500 fabricado pela Soilmoisture Equipment Corporations. Esse equipamento permite a extração de umidade de solos pelo processo de secagem com uma pressão de até 1500 kPa.

- **Procedimentos utilizados durante o ensaio**

Inicialmente colocou-se a célula de placa cerâmica de 1 bar imersa em uma bandeja com água destilada por 24 horas para que esta fosse completamente saturada.

Estando saturada, a célula de placa cerâmica foi colocada sobre o suporte triangular, dentro da Câmara de Pressão de Richards e foi conectada ao tubo de escoamento.

Para o ensaio extraíram-se 4 amostras indeformadas de cada bloco, com o auxílio de anéis medindo 2 polegadas de diâmetro por 20mm de altura, obtendo-se inicialmente o valor correspondente à massa do anel mais solo.

Durante a moldagem dos anéis, foram utilizadas amostras deformadas, para a determinação do teor de umidade em que o solo se encontrava.

Do total das amostras, três foram, levadas para a Câmara de Pressão de Richards sendo colocados sobre a célula de placa cerâmica, em seguida aspergiu-se água sobre a placa cerâmica, deixando-a com excesso de água até a saturação das amostras, por capilaridade (Figura 5.60).

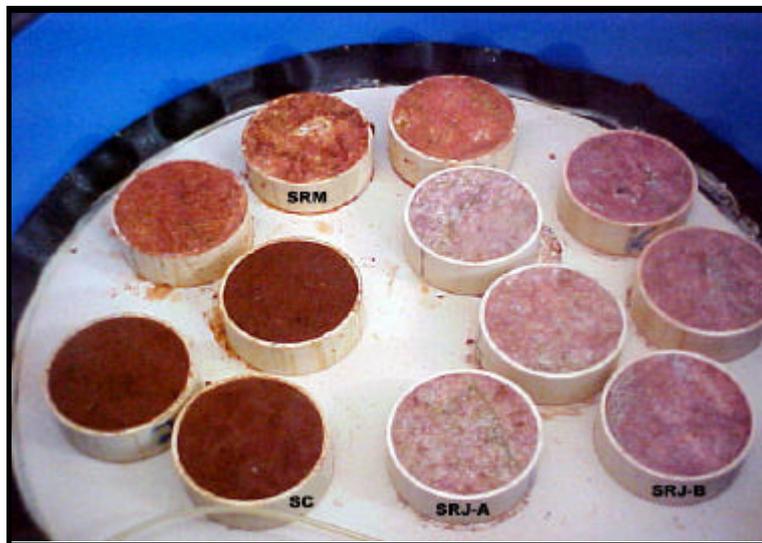


Figura 5.60– Saturação de amostras de solos por capilaridade sobre placa cerâmica

Observou-se que ao serem saturadas, as amostras de Solo Residual Maduro (SRM) sofreram expansão e perda de solo (Figura 5.61).



Figura 5.61 – Expansão da amostra de Solo Residual Maduro (SRM)

O outro anel foi colocado sobre uma pedra porosa mais papel filtro, dentro de uma bandeja, onde foi acrescentada água mantendo-se o nível na base da amostra, até que essa ficasse saturada por capilaridade, após o que foi determinado o seu teor de umidade (Figura 5.62).



Figura 5.62 – Saturação de amostras de solo por capilaridade

A seguir, colocou-se a tampa do extrator de placa cerâmica de modo que esta permanecesse em contato com o sistema de vedação, garantindo um perfeito fechamento.

Aplicaram-se as pressões desejadas, medindo com o auxílio de uma bureta conectada ao tubo de escoamento, a quantidade de água expelida pela amostra até que o equilíbrio fosse atingido.

Atingido o equilíbrio, retirou-se a bureta, desligou-se a pressão aplicada e pesou-se cada anel rapidamente (para evitar a evaporação), colocando-os de volta na Panela de Richards, aplicando-se nova pressão. Este procedimento foi repetido para todas as pressões desejadas, até a obtenção dos valores de sucção versus umidade do solo plotados no gráfico da Figura 5.63.

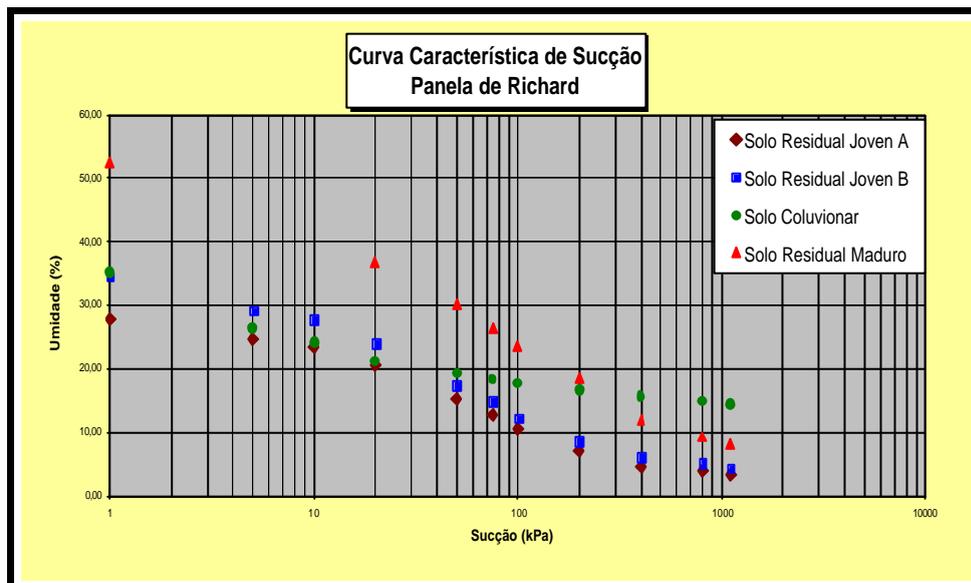


Figura 5.63 – Curva de sucção pelo método de Panela de Richards

Após a aplicação das pressões de 5 e 10 kPa, observou-se que as amostras encontravam-se bem moles, ocorrendo perda de material e deformação dos corpos de prova, não apresentando condições de serem retiradas para a pesagem por correrem risco de perda total do material.

Na pressão de 20 kPa, um dos anéis, contendo Solo Residual Maduro, sofreu perda significativa de solo, devido à retração diametral e expansão longitudinal, sendo desprezado os outros dois que também sofreram perdas, entretanto, em quantidades menores, portanto, sendo essas perdas desconsideradas.

Durante a realização do ensaio, tomou-se o cuidado de utilizar célula de placa cerâmica compatível com a pressão aplicada, como pode ser verificado na Tabela 5.22.

Tabela 5.22 - Célula de placa cerâmica e suprimento de gás utilizado no ensaio

Pressão aplicada (kPa)	Célula de placa cerâmica (kPa)	Suprimento de gás	Dias gastos para atingir o equilíbrio
5	100	CA	2
10	100	CA	2
20	100	CA	2
50	100	CA	4
75	100	CA	8
100	100	CA	6
200	300	CA	2
400	1500	TN	9
800	1500	TN	5
1100	1500	TN	2

CA – Compressor de ar TN – Tanque de Nitrogênio

- **Análise dos Resultados pelos dois métodos**

Para uma melhor visualização e avaliação dos resultados do ensaio, estes são apresentados nas Tabelas 5.23 e 5.24 e plotados em forma de gráficos cartesianos com as curvas características de sucção obtidas segundo os dois métodos empregados (Figura 5.64).

Destaca-se para os ensaios que, quando a técnica requer uma fase de saturação preliminar dos corpos de prova, como é o caso do ensaio pelo método de Panela de Richards que parte de uma condição inicial próxima a saturação das amostras de solo, implicando em dizer que a presença de finos

nesses solos possa vir a influenciar nos resultados obtidos, pelas características inerentes desses materiais, quando da presença de água.

Tabela 5.23 – Valores obtidos pelo método do Papel Filtro

Solo Residual Jovem A		Solo Residual Jovem B		Solo Coluvionar		Solo Residual Maduro	
Umidade (%)	Sucção (Kpa)	Umidade (%)	Sucção (Kpa)	Umidade (%)	Sucção (Kpa)	Umidade (%)	Sucção (Kpa)
20,17	24,19	13,80	90,79	16,15	509,71	17,99	144,64
22,33	26,23	26,06	13,50	18,93	66,49	16,90	101,04
22,28	27,51	25,79	7,46	10,68	7531,45	20,81	158,45
20,12	27,51	28,73	7,46	3,59	7531,45	16,56	158,45
12,79	134,05	32,08	8,04	13,73	6636,33	12,46	370,35
11,37	331,56	32,55	5,70	22,67	35,12	4,56	1643,88
28,52	7,51	18,78	39,63	14,21	4539,77	22,15	69,97
28,72	8,04	18,94	18,57	12,68	7018,60	24,67	61,21
23,94	10,30	28,47	11,54	24,83	11,29	27,57	31,97
28,01	11,50	20,04	27,95	6,53	27,95	30,53	18,46
27,23	1,00	29,34	1,00			37,83	1,00

Tabela 5.24 – Valores obtidos pelo método da Panela de Richards

Solo Residual Jovem A		Solo Residual Jovem B		Solo Coluvionar		Solo Residual Maduro	
Umidade (%)	Sucção (Kpa)	Umidade (%)	Sucção (Kpa)	Umidade (%)	Sucção (Kpa)	Umidade (%)	Sucção (Kpa)
27,86	1	34,54	1	35,16	1	52,58	1
24,63	5	29,25	5	26,43	5	36,81	20
23,39	10	27,78	10	24,11	10	30,18	50
20,63	20	24,03	20	21,25	20	26,43	75
15,34	50	17,33	50	19,31	50	23,44	100
12,66	75	14,92	75	18,41	75	18,64	200
10,64	100	12,26	100	17,76	100	11,99	400
7,08	200	8,60	200	16,67	200	9,33	800
4,64	400	5,98	400	15,57	400	8,11	1100
4,03	800	5,08	800	14,83	800	-	-
3,33	1100	4,37	1100	14,44	1100	-	-

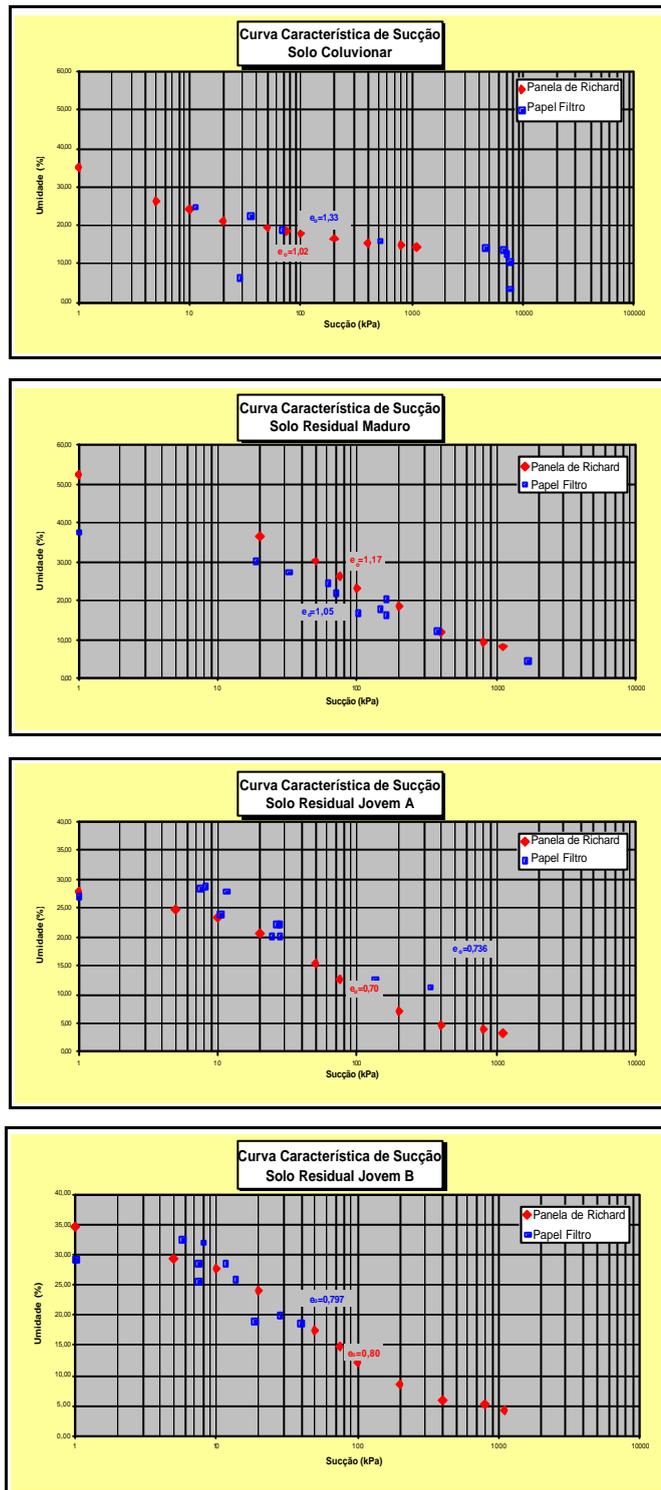


Figura 5.64 – Curvas características de sucção versus umidade, obtidas segundo os métodos de Papel Filtro e da Panela de Richards

Solo coluvionar

Dentre os solos ensaiados, o solo coluvionar é o que possui a maior fração argila em sua composição estrutural (Tabela 5.1).

Segundo Campos et al. (1992):

“solos argilosos, além das forças capilares, as forças de adsorção são parcelas significativas da sucção mátrica devido à natureza das partículas. Assim sendo, é de se esperar que quanto maior a atividade dos minerais que constituem o solo, maior seja o volume de água retida por adsorção para um determinado nível de sucção”.

Observa-se nos gráficos acima descritos, que para o solo coluvionar a variação entre as curvas obtidas pelos métodos do papel filtro e panela de Richards é pequena, não sendo observado entre elas, efeito de histerese⁹ durante a trajetória de secagem e umedecimento das amostras de solo.

A curva característica de sucção pelo método do papel filtro (umedecimento e secagem), apresenta valores superiores de sucção, quando comparada a outra curva pelo método da panela de Richards. Isto pode ser entendido pela diferença à maior do índice de vazio ou macroporosidade apresentada pelo solo, o que pode vir a contribuir para acelerar a trajetória de secagem dessa curva, fazendo com que apresente níveis de sucção elevado, próximo a 10.000 kPa, para teores de umidades médias de aproximadamente 12%, o que vem a proporcionar uma curva com tendência diferenciada das demais curvas neste trecho do gráfico.

Já para o intervalo de sucção entre 10 e 1.000 kPa, essas curvas mantêm um comportamento coerente, em função das variações da sucção com

⁹ Histerese, de acordo com Tácio et al. (1992), “tem sido verificado experimentalmente que a curva característica de sucção de uma amostra de solo é dependente da trajetória de secagem ou umedecimento seguida, ou seja, sucções diferentes podem ser esperadas caso o solo tenha aumentado ou diminuído seu grau de saturação”.

a umidade atribuída a cada ponto do ensaio. Ocorrendo somente uma discrepância entre elas, quanto a variação da sucção de 0 a 10 kPa em função da saturação dessas amostras, podendo esse fato ser atribuído a diferença entre os métodos.

Solo Residual Maduro

Para o ensaio, a amostra de solo Residual Maduro é a que apresenta um maior teor de finos, se comparada às demais amostras de solos submetidas aos mesmos métodos deste ensaio, com destaque para a fração silte presente na sua composição estrutural.

Analisando-se o gráfico pertencente ao solo Residual Maduro pode-se dizer que as curvas de sucção entre os dois métodos (panela de Richards e papel filtro) apresentam uma boa correlação para sucções acima de 300 kPa e umidades abaixo de 12%. Sendo que, para valores inferiores a estes, há um comportamento diferenciado entre elas, se comparadas, de uma forma geral, as demais curvas obtidas para os diferentes tipos de solos submetidos aos mesmos ensaios. Isto pode ser explicado pelo surgimento de planos de fraqueza e perda de solo ocorrido durante o ensaio com a utilização do método da panela de Richard, sendo esses decorrentes dos esforços de retração diametral e expansão longitudinal atuantes nas amostras, fato este constatado logo após a sucção ter atingido valores de 20kPa para uma umidade média de 37% na amostra (Figuras 5.59 e 5.62).

Não foi observado nas curvas características de sucção do solo, efeito de histerese, durante a trajetória das curvas de umedecimento e secagem pelos dois métodos.

Pelas ocorrências evidenciadas, tanto no gráfico como nas amostras, pode-se dizer que este solo pode vir a sofrer processo inicial de

desestruturação a partir de valores de sucção inferiores a 300kPa e umidades crescentes até a sua saturação.

Solo Residual Jovem A

Essa amostra de solo apresenta valores expressivos para teores de finos, com destaque para a fração silte.

As curvas características referentes aos ensaios realizados (Figura 5.64) apresentam-se de certa forma, coerentes para o intervalo de sucção entre 10 a 330 kPa. Sendo que, a partir desses limites observa-se para sucções acima de 300 kPa, somente a trajetória da curva representativa do ensaio referente à panela de Richards. Já para o outro extremo desse limite, sucções menores do que 10 kPa, onde foi observada uma pequena tendência de inversão dessas curvas em relação aos teores de umidades obtidas pelos dois métodos. Embora muito próxima esta tendência de inversão pode ser interpretada como sendo um indício de ocorrência de expansibilidade dessa amostra de solo, se comparadas com o mesmo comportamento das curvas características para o solo residual maduro, que apresentam essa tendência, porém de uma forma mais atuante, para valores abaixo de 20kPa quando submetida às mesmas condições desses ensaios (Figura 5.64).

Convém observar que, não foi apresentado pelas curvas características, efeito de histerese durante as trajetórias de umedecimento e secagem das amostras.

Mediante as observações, pode-se concluir que o solo ora ensaiado mostra-se susceptível a sofrer processos de desestruturação para valores de umidades superiores a 27% e sucções inferiores a 10 kPa.

Solo Residual Jovem B

Este solo se comparado aos demais solos submetidos aos mesmos métodos deste ensaio, é o que apresenta a menor quantidade de finos. Com ocorrência em maior proporção da fração silte em sua estrutura.

Para um melhor entendimento do comportamento da trajetória das curvas características deste solo, procurou-se dividi-las em três trechos. O primeiro refere-se ao intervalo que registra valores de sucções compreendidos entre 10 e 50 kPa com teores de umidades entre 27 e 17%, respectivamente. Onde se pode observar uma tendência de aproximação dessas curvas. Para o extremo, com sucção acima de 50 kPa, somente evidencia-se a trajetória da curva característica de sucção da panela de Richards, com valor para sucção de 1100 kPa para um teor de umidade de 4%. Já para o terceiro extremo, com sucção abaixo de 10 kPa, essas curvas tendem a se inverterm passando a trajetória da curva característica da panela de Richards a sobrepor a apresentada pelo método do papel filtro (Figura 5.64). Embora para o ensaio com o método da panela de Richards o solo parta de uma condição de umedecimento para uma condição de secagem, os ensaios com os solos envolvidos com a aplicação das duas metodologias, mostram de um modo geral, que a inversão dessas curvas para uma determinada sucção e umidade correspondente, pode ser considerada como um indício de ocorrência de processos de retração e expansibilidade, para as amostras ensaiadas.

Levando-se em conta as observações acima, pode-se concluir mais uma vez ser este solo, susceptível a sofrer processos de expansão para valores de sucções inferiores a 10 kPa, com ocorrência para teores de umidades acima de 27%, até a saturação total da amostra (sucção nula). Fato este, que provavelmente condiciona o solo a atingir o início do estado de desagregação. Evidenciado durante o processo de saturação dessa amostra de solo no ensaio com o método da panela de Richards. Cabe observar que, para o ensaio não foi

evidenciado nas curvas características efeito de histerese durante as trajetórias de umedecimento e secagem das amostras.

5.5.5. Ensaio de Resistência a Tração – Método Brasileiro

Uma das formas de se avaliar o “destacamento” das partículas de um solo é através da realização de ensaios de resistência à tração, devido a facilidade apresentada pelos solos em terem suas partículas destacadas umas das outras em função das umidades apresentadas por estes. Como a variação de umidades implica em diferentes níveis de sucção, responsável direta pela resistência do solo, optou-se por realizar este ensaio com as amostras na umidade natural, e secas ao ar.

- **Metodologia**

O ensaio consiste na aplicação de cargas de compressão em duas posições diametralmente opostas, sobre um corpo de prova cilíndrico, conforme mostrado na Figura 5.65.

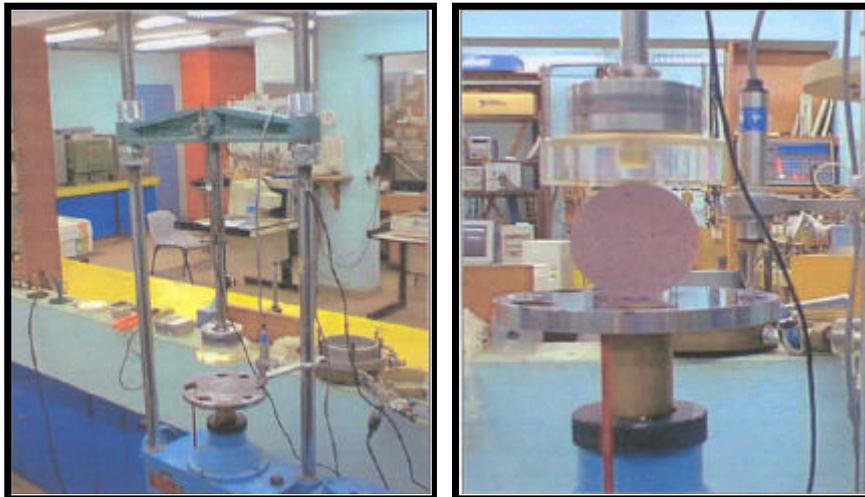
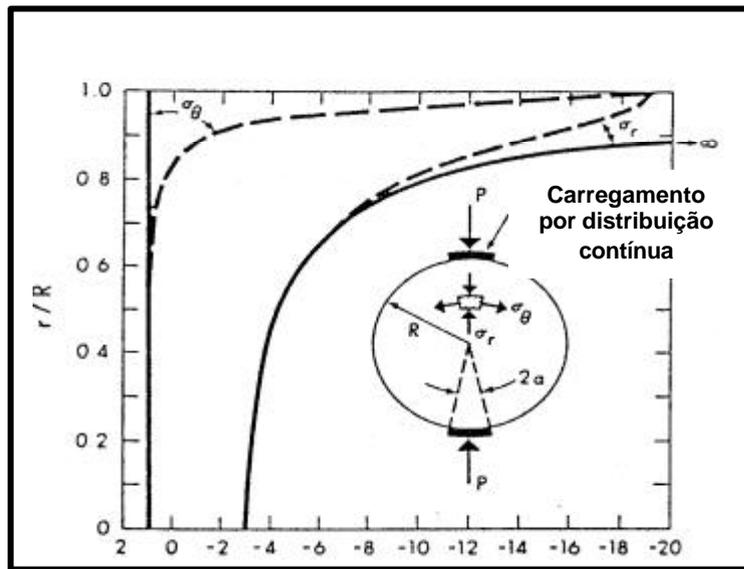


Figura 5.65 – Ensaio de tração (equipamento e ensaio em andamento)

Krishnaya e Eisenstein (1974), descrevem que o ensaio brasileiro de resistência à tração, apresenta diversas vantagens em relação a outros métodos de avaliação da resistência à tração:

- Facilidade da preparação das amostras;
- Utilização de equipamento similar ao ensaio de compressão simples;
- Ruptura relativamente insensível às condições de superfície e planos de compactação da amostra, iniciada em uma região de tensões de tração, relativamente uniformes (Figura 5.66).



---- Solução por carregamento distribuído continuamente (Fracht, 1957)
 — Solução por carregamento pontual (Hondros, 1959)

Figura 5.66 - Soluções teóricas das tensões ao longo do diâmetro vertical de uma amostra de solo submetida a compressão diametral

Teoricamente, o ensaio de compressão diametral é executado em corpos de prova cilíndricos, ao longo dos eixos verticais de simetria, que passa pelos pontos de aplicação da carga, e na direção normal a esse eixo, na qual a tensão exercida é a de tração e considerada constante, sendo dada por:

$$s_t = 2P / p \quad hd \quad (7)$$

Onde P é considerado como a carga máxima de compressão diametral, uniformemente distribuída ao longo da geratriz do corpo de prova, sendo h e d, respectivamente, a altura e o diâmetro inicial da amostra de solo.

Krishnayya e Eisenstein (1974), descrevem que a relação acima representada pela equação (7), “não é rigorosamente adequada para materiais que apresentam diferentes módulos de elasticidade na compressão e na tração, como é o caso de solos”. Portanto, sendo o objetivo principal deste trabalho qualitativo, de forma a relacionar os resultados encontrados para os diferentes tipos de solos com seus comportamentos à erosão observada em campo, optou-se pelo uso desta metodologia.

Assim sendo, para os ensaios realizados no laboratório de solos da PUC - Rio, foram adotados os mesmos procedimentos utilizados por Maciel (1991). Portanto, utilizaram-se amostras de solos com 7,15 cm de diâmetro por 2,0 cm de espessura, levadas a ruptura nas umidades natural e seca ao ar.

Este ensaio, com velocidade de carregamento igual a: 0,2 mm/ min, possibilitou a obtenção da carga máxima de compressão “P” através da curva de calibração da célula de carga com a placa acrílica e o equipamento de leitura, até o rompimento da amostra.

- **Análise dos Resultados**

Esta análise objetiva avaliar o comportamento mecânico dos solos estudados, estabelecendo-se de certa forma, uma correlação entre a resistência à tração do solo versus o seu deslocamento diametral, levando-se em conta a sua umidade e o grau de saturação das amostras, estando esses valores representados nas Tabelas 5.25 e 5.26 e gráficos constantes da Figura 5.67.

Tabela 5.25 – Amostra de solo na umidade natural

Amostra	γ_s (g/cm ³)	g_{topo} (kN/m ³)	e_o	S (%)	w_i (%)	w_f (%)	Resistência a Tração (kPa)
SNE	2,7805	17,88	0,8	63,3	18,29	17,79	1,4
Colúvio	2,7051	11,77	1,57	24,4	14,22	13,7	9,0
SRM	2,7476	15,62	1,09	53,4	21,15	19,36	23,5
SRJB	2,7214	19,06	0,72	86,9	23,09	24,39	19,5
SRJA	2,7506	18,82	0,77	83,9	23,44	21,73	20

Tabela 5.26 – Amostra de solo seca ao ar

Amostra	γ_s (g/cm ³)	g_{topo} (kN/m ³)	e_o	S (%)	w_i (%)	w_f (%)	Resistência a Tração (kPa)
SNE	2,7805	14,81	0,87	5,3	19,68	1,68	12,8
Colúvio	2,7051	9,66	1,78	2,0	14,4	1,33	2,5
SRM	2,7476	13,23	1,05	2,4	19,92	0,91	37,8
SRJB	2,7214	15,01	0,79	1,5	24,53	0,43	24,0
SRJA	2,7506	14,9	0,82	2,0	26,97	0,60	10,0

Uma análise desses resultados pode ser feita comparando-se os valores de resistência a tração (s_t), com amostras na umidade natural e seca ao ar.

Dessa forma, verifica-se nas tabelas acima que para o ensaio com amostras na umidade natural quando comparadas às condições das amostras na umidade seca ao ar, não se observa mudanças significativas referentes aos índices de vazios, porém, como já era esperado, verifica-se um decréscimo desses valores relativos aos outros índices físicos apresentados nas tabelas acima.

Para o ensaio, com as amostras de solos secas ao ar, foram observados valores elevados de resistência à tração para os solos Residual Maduro e Jovem-B, tendo sido verificada essa ocorrência, em menor escala, no solo laterítico (SNE). Para os solos Coluvionar e Residual Jovem-A, observa-se um

decréscimo desses valores, provavelmente atribuído à perda de água intersticial na microestrutura desses solos.

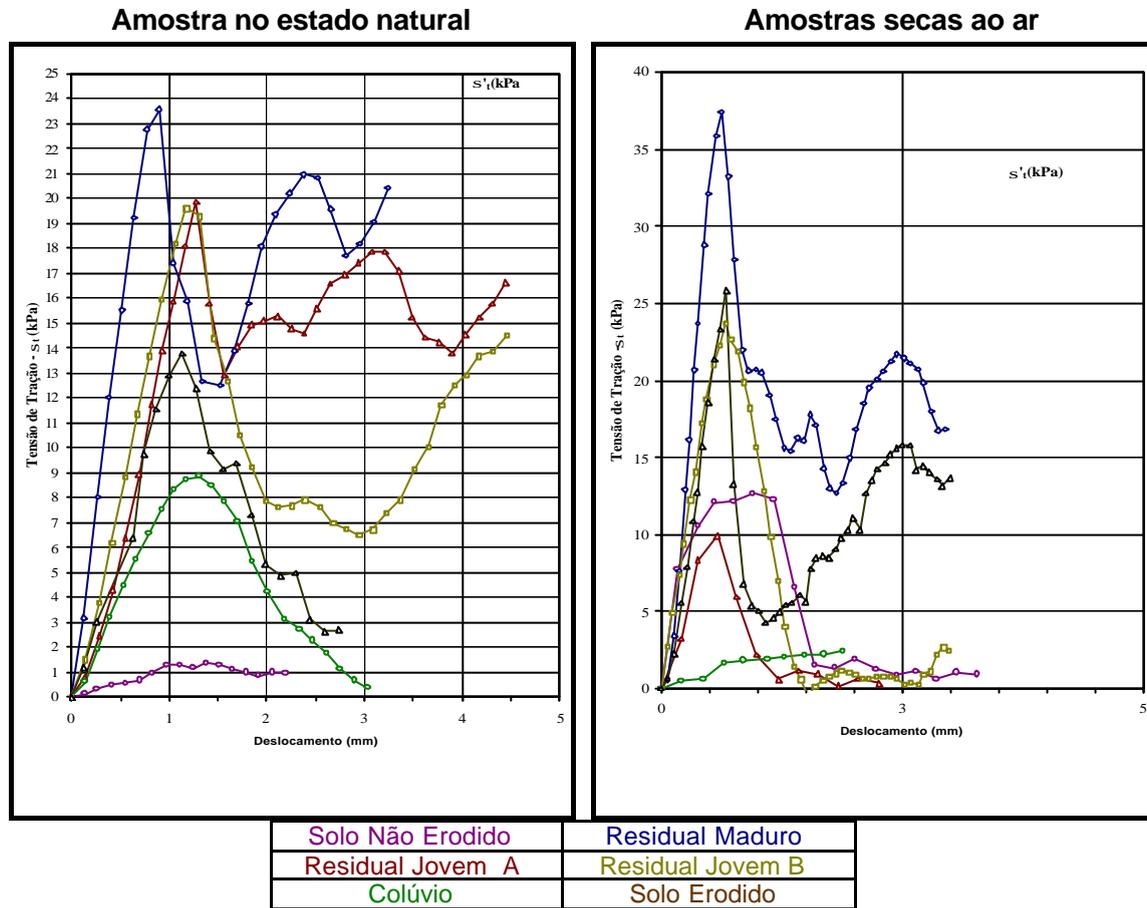


Figura 5.67 – Representação gráfica das amostras natural e seca ao ar

Os valores elevados podem ser justificados pela predominância de componentes cimentantes na microestrutura desses solos, cujas componentes das forças resistentes a esforços de tração, aumentam a medida em que o processo de secagem desses solos evolui. Sugere-se assim, uma maior investigação na ocorrência desse fenômeno em pesquisas futuras.