4
Caracterização do Solo e do Licor Cáustico

4.1.
Introdução

Procurando representar o mais fielmente possível o fenômeno acontecido, tanto o solo como o licor cáustico, utilizados nesta pesquisa provêm do local onde aconteceram os recalques.

O solo foi extraído a uma profundidade de dois metros, em locais da fábrica denominados Cava Sul e Cava Norte, e foi enviado em forma de blocos cúbicos indeformados de aproximadamente 30 cm de aresta. O licor, que é uma mistura de hidróxido de sódio, alumínio e ferro, foi enviado e armazenado em um tonel plástico de aproximadamente 30 litros. No fundo do tonel, apresentava-se um volume decantado de uma substância branca que, inicialmente acreditou-se ser alumina pura. Este material é identificado como *resíduo*.

Neste capítulo, serão apresentados os resultados da caracterização físico-química do licor e do solo, e a caracterização geotécnica e mineralógica do solo. Os procedimentos de ensaio utilizados estão descritos no Anexo 1.

4.2.
Características físico-químicas do licor cáustico

Para caracterizar o licor, foram executados ensaios de teor alcalino, pH, condutividade elétrica assim como determinados a densidade total e os conteúdos de ferro e alumínio total para as concentrações utilizadas nos ensaios edométricos.

Com a finalidade de escolher as concentrações a serem utilizadas nos ensaios edométricos, preparam-se soluções de licor cáustico e água destilada em volume de 0 a 100 % de licor, crescendo de 10 em 10 %. Nestas soluções, foram determinados inicialmente os valores de pH, teor alcalino e condutividade elétrica.

O pH foi medido com auxilio de um aparelho da WTW, com eletrodo Senlix 41. Concomitantemente, foi medida a condutividade elétrica utilizando o mesmo

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 0210661/CA

aparelho com uma sonda Probe TetraCon 325. Tanto o eletrodo, como a Sonda estavam providas de sensor de temperatura.

O teor alcalino das soluções foi avaliado através da titulação com uma solução de ácido sulfúrico 0.1 N.

Para avaliar a densidade das soluções utilizou-se o método do picnômetro, tradicionalmente empregado para determinar a densidade relativa de grãos em solos.

A determinação dos conteúdos de alumínio e ferro totais foi executada mediante digestão ácida das amostras, de acordo com o procedimento EPA-Method 3010^{A} - "Acid Digestion of Aqueous Samples and extracts for total metals for Analysis by FLAA or ICP Spectroscopy".

Os resultados destas avaliações estão resumidos e apresentados nas Tabelas 4.1, 4.2 e 4.3, e nas figuras 4.1, 4.2 e 4.3. As concentrações citadas como C_1, C_2 e C_3 correspondem às utilizadas nos ensaios edométricos C_1, C_2 e C_3 (ver tabela 3.1), respectivamente. Assim, a concentração C_1 corresponde a um teor alcalino de 20 g/l, enquanto que as concentrações C_2 e C_3 correspondem a teores alcalinos de cerca de 70 g/l e 10 g/l.

Tabela 4.1– Resumo das analises nas soluções de licor.

Amostra	Teor Alcalino (g/l)				pH	CE (ms/cm)
	Alcalinidade de Hidróxidos	Alcalinidade de Carbonatos	Alcalinidade de Bicarbonatos	Alcalinidade Total		
10 % L	12,336	3,648	0,000	15,984	12,56	52,9
20 % L	29,376	7,584	0,000	36,960	12,75	99,9
30 % L	43,056	9,120	0,000	52,176	12,84	131,2
40 % L	57,481	14,570	0,000	72,051	12,83	174,2
50 % L	73,132	17,296	0,000	90,428	12,83	203,0
60 % L	92,966	22,654	0,000	115,620	12,94	229,0
70 % L	102,084	23,218	0,000	125,302	12,92	250,0
80 % L	104,400	24,000	0,000	128,400	12,88	266,0
90 % L	107,008	24,984	0,000	131,992	12,91	280,0
100 % L	128,064	25,920	0,000	153,984	12,91	291,0

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 0210661/CA

Tabela 4.2 – Propriedades dos licores cáusticos utilizados nos ensaios edométricos.

Amostra	pH	CE (ms/cm)	Teor. Alc. (g/l)	Alumínio (ppm)	Ferro (ppm)
Licor Puro	12,91	291,00	153,98	68705,90	3,90
C_1	12,52	72,20	20,00	2509,80	2,40
C_2	12,91	170,20	70,00	3461,80	3,00
C_3	12,50	38,58	10,00	2197,10	2,40
Resíduo	12,40	42,20	72,29	62,790	0,21

Tabela 4.3 - Densidade dos licores cáusticos utilizados nos ensaios edométricos.

Amostra	Densidade Total p (g/cm^3)	Teor Alcalino (g/l)
C_1	1,027(*)	20
C_2	1,064(*)	70
C_3	1,010(*)	10

(*) medição feita a 20 ºC.

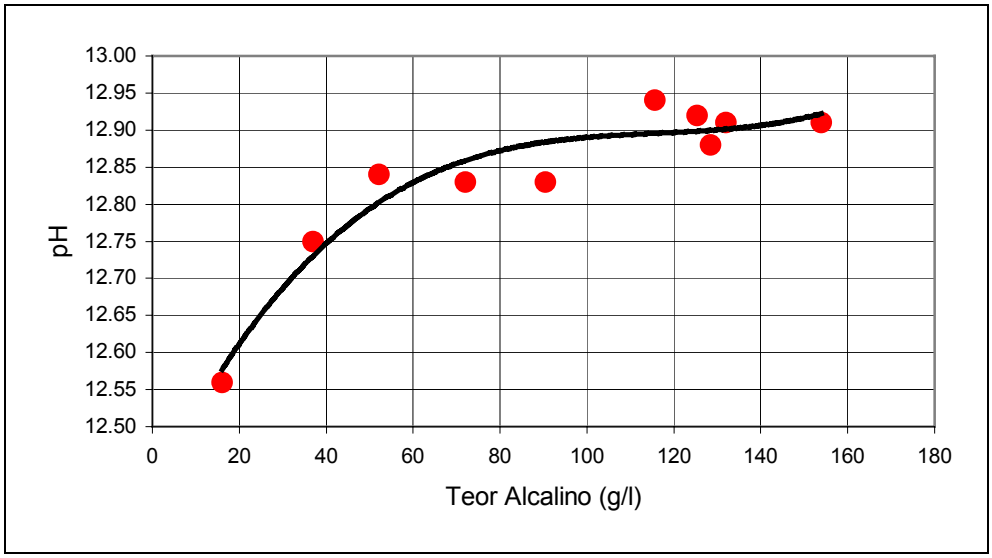


Figura 4.1 – Variação do pH dos licores cáusticos com o teor alcalino

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 0210661/CA

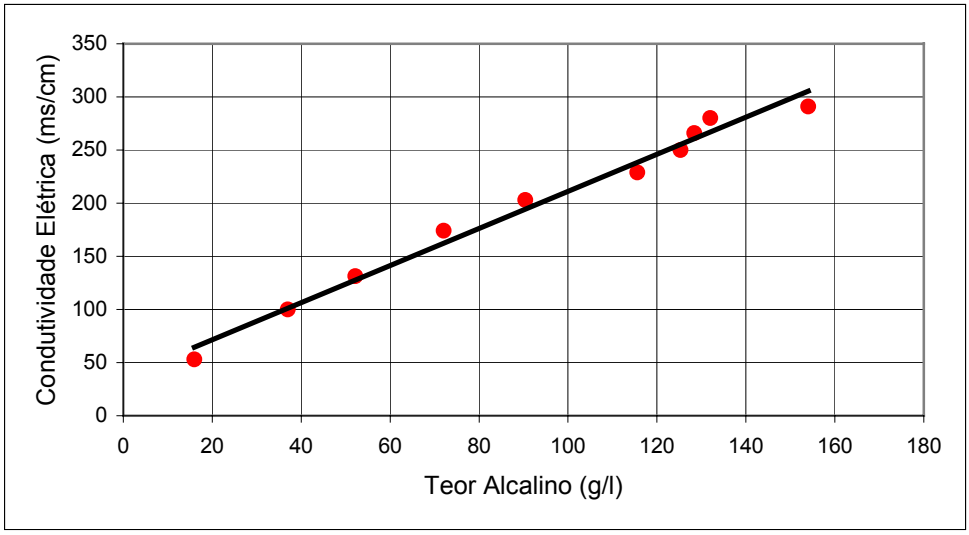


Figura 4.2 – Variação da Condutividade Elétrica dos licores cáusticos com o teor alcalino.

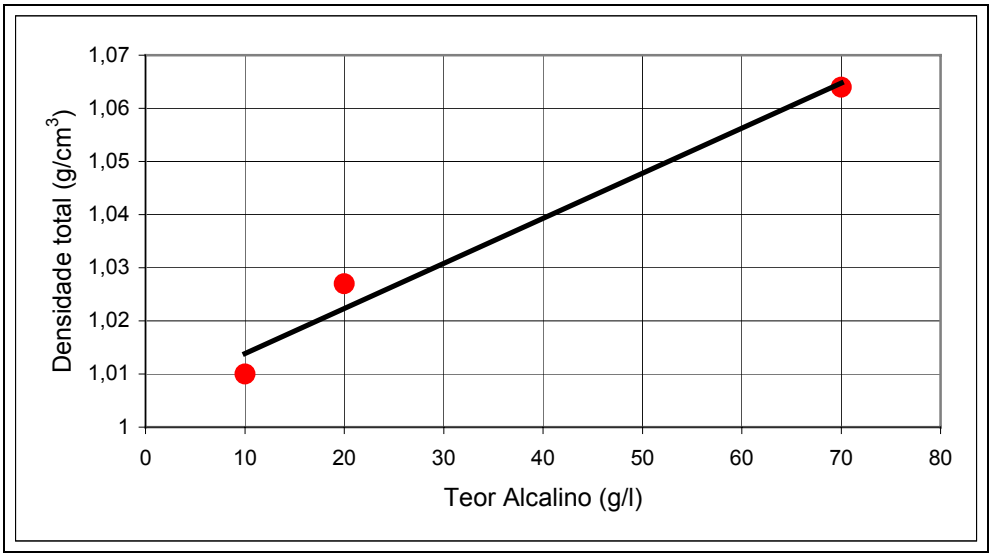


Figura 4.3 – Variação da Densidade dos licores cáusticos com o teor alcalino.

4.3.
Ensaios de Caracterização do solo

Os ensaios de caracterização compreenderam: (a) ensaios de caracterização física: ensaios de granulometria e sedimentação convencionais, sedimentação em água, sedimentação utilizando os licores nas concentrações C_1, C_2 e C_3 como defloculante; densidade dos grãos (Gs), e limites de consistência; (b) caracterização mineralógica: difração de Raios-X e lâminas petrográficas; e (c) caracterização físico-química: determinação de pH,

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 0210661/CA

condutividade elétrica, capacidade de troca catiônica, superfície especifica e conteúdos de ferro e alumínio totais.

Como já foi indicado no inicio do capítulo, o solo utilizado provém de locais denominados Cava Sul e Cava Norte. Para facilitar a interpretação dos resultados apresentados, adotou-se a seguinte identificação:

Tabela 4.4 – Identificação dos solos ensaiados

Ensaio Edométrico No.	Local de Extração	Bloco	Identificação
C_1	Cava Sul	3	E1-CS3
C_2	Cava Norte	3	E2-CN3
C_3	Cava Norte	2	E3-CN2

4.3.1. Caracterização física

As rotinas utilizadas na execução destes ensaios correspondem ao estabelecido pelas Normas da ABNT.

- ***Ensaio de Granulometria***

Dado que o solo analisado é formado por frações grossas e finas, fizeram-se ensaios de granulometria conjunta, tanto nos materiais sem contaminar como nos materiais contaminados (após o ensaio edométrico).

No caso dos materiais contaminados, além do ensaio de sedimentação convencional com hexametafosfato de sódio como defloculante, fizeram-se ensaios de sedimentação sem defloculante, utilizando só água. Isto foi feito com o intuito de verificar a existência de alguma reação química entre o licor cáustico e o hexametafosfato de sódio, que pudesse levar a resultados errôneos no ensaio de sedimentação.

Também a fim de estudar o efeito do licor cáustico na dispersão das partículas de solo, realizaram-se ensaios adicionais, utilizando o licor nas concentrações C_1, C_2, C_3 e puro, como defloculante. Para isto, colocou-se 50 gramas de solo passante na peneira # 40 (solo E2-CN3) em 125 ml de solução cáustica nas concentrações antes mencionadas, e deixou-se em repouso por um período de aproximadamente 24 horas. Em seguida, procedeu-se à dispersão

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 0210661/CA

mecânica, e colocou-se a mistura em uma proveta de 1000 ml cujo volume foi completado com água destilada.

A Figura 4.4 apresenta as curvas granulométricas dos materiais sem contaminar e, na Tabela 4.5 tem-se um resumo das granulometrias destes materiais.

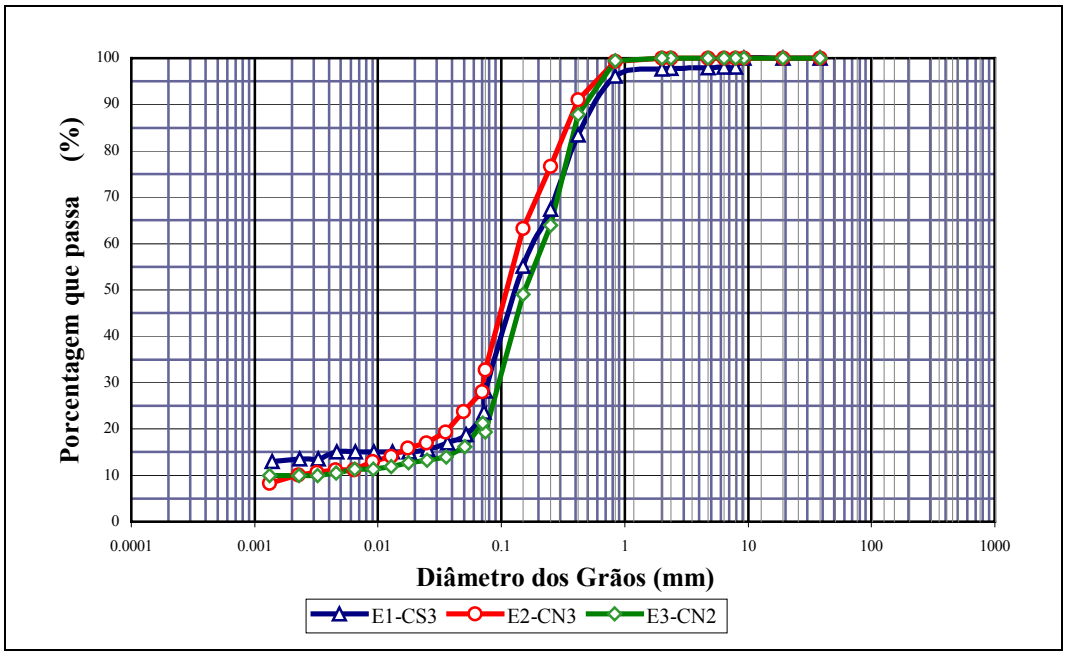


Figura 4.4 – Curvas Granulométricas dos materiais naturais.

Tabela 4.5 - Resumo da granulometria dos materiais naturais

Material	Areia				Finos		
	Grossa	Media	Fina	Total	Silte	Argila	Total
E1-CS3	9	28	40	77	8	13	21
E2-CN3	5	25	44	74	16	10	26
E3-CN2	7	36	39	82	9	10	19

Na figura 4.5 e na tabela 4.6 são apresentados os resultados de granulometria do ensaio 1, ou seja depois da percolação do licor na concentração C_1. Nos casos em que corresponde, estão diferenciados os ensaios com defloculante (D) e com água (A)

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 0210661/CA

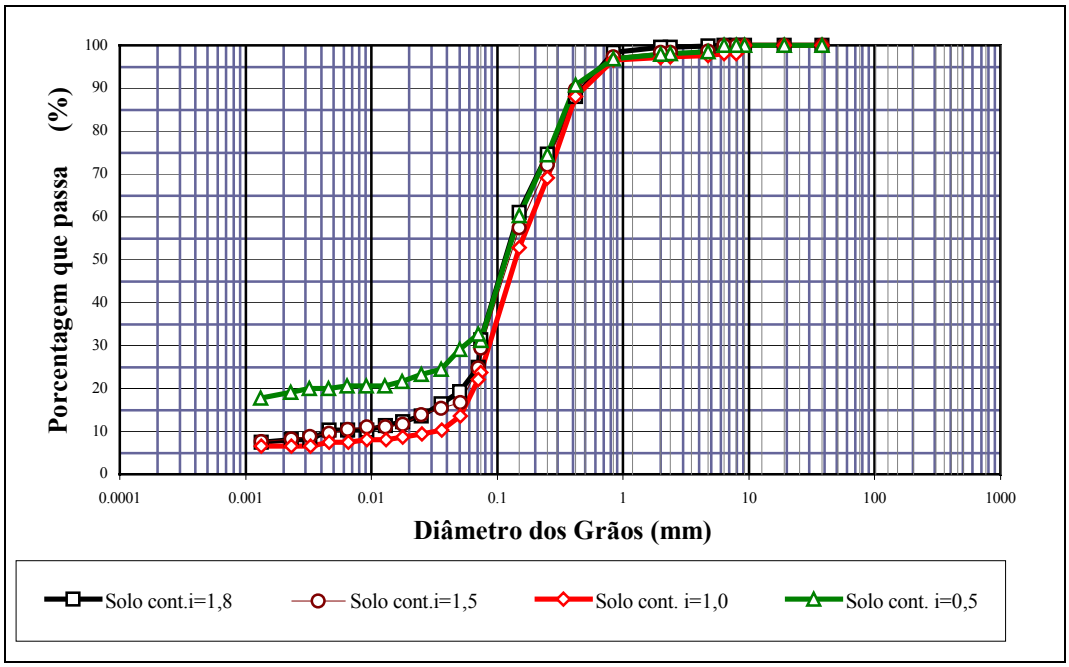


Figura 4.5 – Curvas Granulométricas Ensaio C_1

Tabela 4.6 - Resumo da Granulometria – Ensaio C_1

Gradiente Hidráulico (*)	Areia								Finos					
	Grossa		Media		Fina		Total		Silte		Argila		Total	
	D	A	D	A	D	A	D	A	D	A	D	A	D	A
i = 1,8 (*)	7	-	25	-	46	-	78	-	14	-	8	-	22	-
i = 1,5(*)	5	-	28	-	44	-	77	-	12	-	8	-	20	-
i = 1,0(*)	5	-	31	-	44	-	80	-	11	-	7	-	18	-
i = 0,5(*)	5	5	26	24	39	44	70	73	12	10	16	16	28	26

(*) gradiente hidráulico usado no ensaio edométrico.

Nas figuras 4.5 e 4.6, e nas tabelas 4.7 e 4.8 se apresentam os resultados para os ensaios C_2 e C_3.

Tabela 4.7– Resumo de Granulometria – Ensaio C_2

Gradiente Hidráulico (*)	Areia								Finos					
	Grossa		Media		Fina		Total		Silte		Argila		Total	
	D	A	D	A	D	A	D	A	D	A	D	A	D	A
i = 4,0	4	4	24	24	42	41	70	69	11	13	18	18	29	31
i = 2,0	4	4	25	24	40	38	69	66	10	14	20	19	30	33
i = 1,0	4	4	25	26	41	38	70	68	12	13	19	19	31	32

(*) gradiente hidráulico usado no ensaio edométrico.

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 0210661/CA

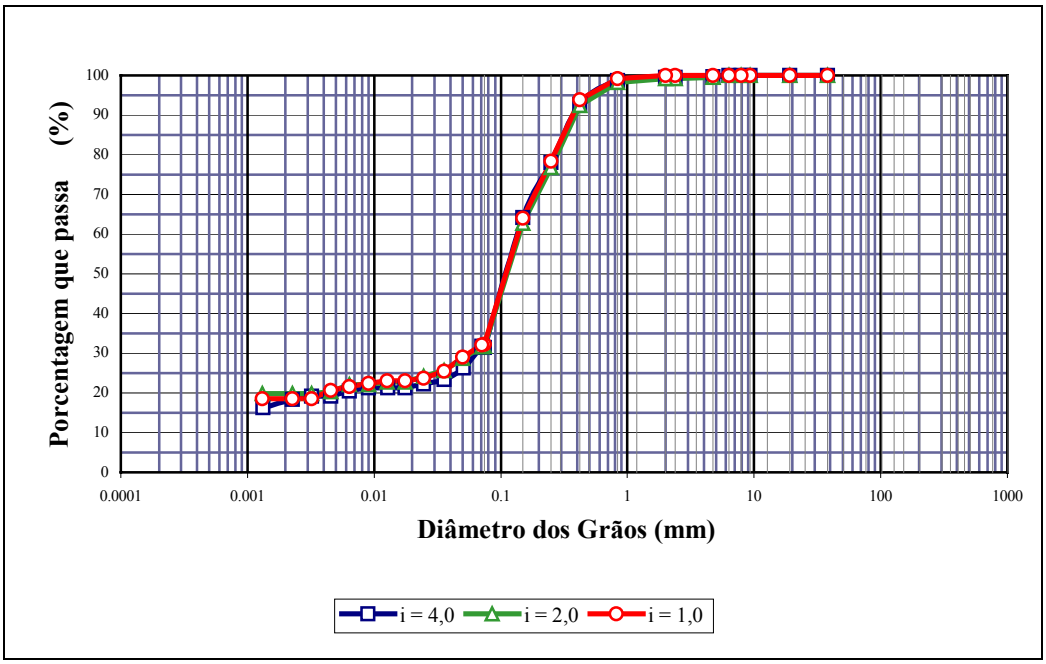


Figura 4.6 – Curvas Granulométricas – Ensaio C_2

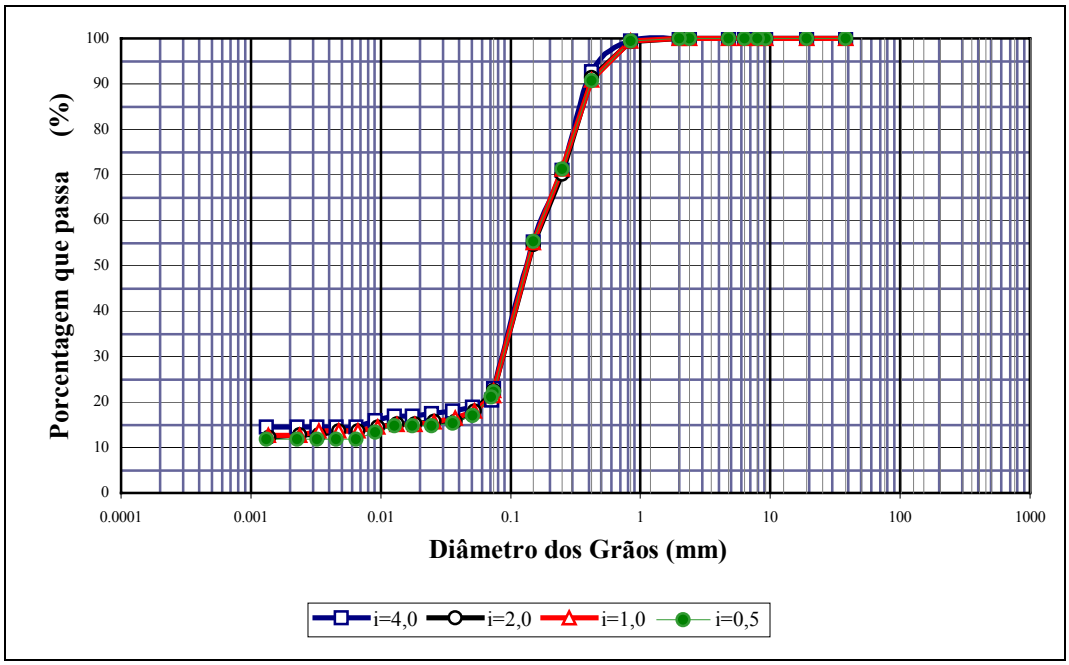


Figura 4.7 - Curvas Granulométricas – Ensaio C_3

Tabela 4.8 - Resumo de Granulometria – Ensaio C_3

Gradiente Hidráulico	Areia								Finos					
	Grossa		Media		Fina		Total		Silte		Argila		Total	
	D	A	D	A	D	A	D	A	D	A	D	A	D	A
i = 4,0	4	5	32	31	44	44	81	80	5	6	14	14	19	20
i = 2,0	5	5	32	31	43	44	80	80	7	6	13	14	20	20
i = 1,0	5	5	31	31	44	42	80	78	6	7	13	14	20	21
i = 0,5	6	6	31	30	44	44	81	80	6	7	14	12	20	19

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 0210661/CA

Na tabela 4.9 e na figura 4.8 se apresentam os resultados para os ensaios Tipo 3.

Tabela 4.9 – Resumo de Granulometria – Ensaio Tipo 3

Material	Areia				Finos		
	Grossa	Media	Fina	Total	Silte	Argila	Total
NC	0,00	0,00	14.72	14,72	34,17	51,11	85,28
C_1=20 g/l	0,00	0,00	16,54	16,54	44,62	38,84	83,46
C_2=70 g/l	0,00	0,00	19,32	19,32	41,98	38,70	80,68
C_3=10g/l	0,00	0,00	14,69	14,69	33,51	51,80	85,31

NC=amostra não contaminada, C1, 2 e 3, concentrações cáusticas utilizadas no ensaio edométrico.

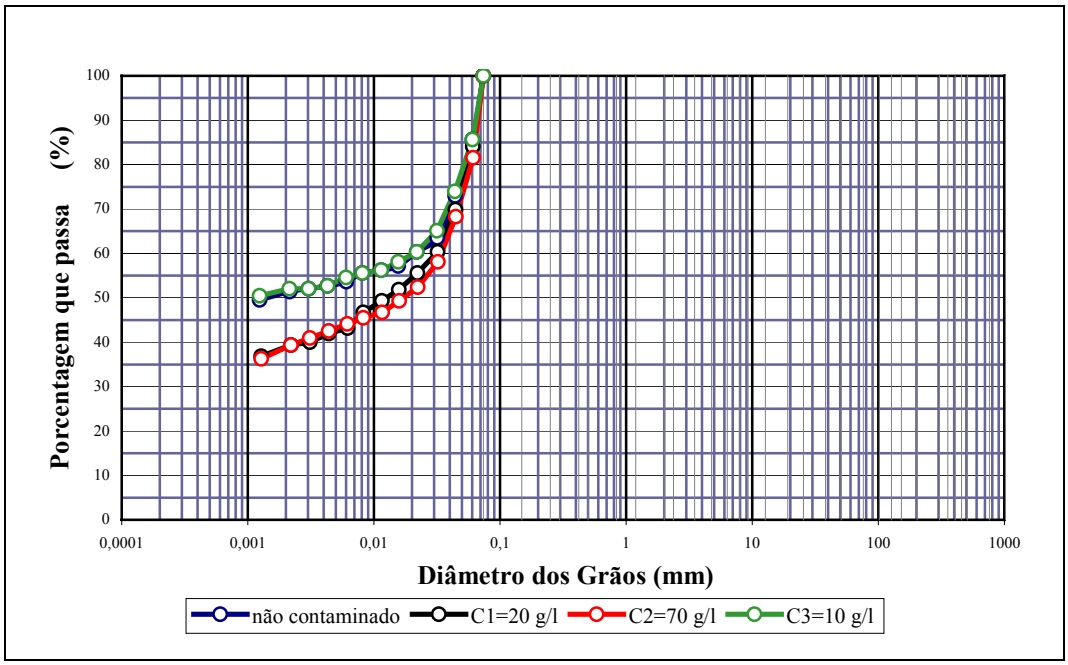


Figura 4.8 – Curvas Granulométricas – Ensaio Tipo 3

Finalmente, os resultados dos ensaios feitos para avaliar a função defloculante do licor cáustico, estão reunidos na tabela 4.10 e na figura 4.9. Esta comparação foi feita somente com o solo do Ensaio C_2 (E2-CN3). Dado que a composição granulométrica dos outros solos é similar, é de se esperar resultados análogos.

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 0210661/CA

Tabela 4.10 - Resumo Sedimentação com diferentes líquidos defloculantes.

Defloculante	Areia				Finos		
	Grossa	Media	Fina	Total	Silte	Argila	Total
Água	5	26	43	74	15	12	27
Hexametafosfato	5	26	45	76	7	18	25
Licor C_1 (20g/l)	5	25	42	72	10	18	28
Licor C_2 (70g/l)	5	25	41	71	19	10	29
Licor C_3 (10g/l)	5	26	46	77	8	14	22
Licor Puro	5	26	39	70	18	13	31

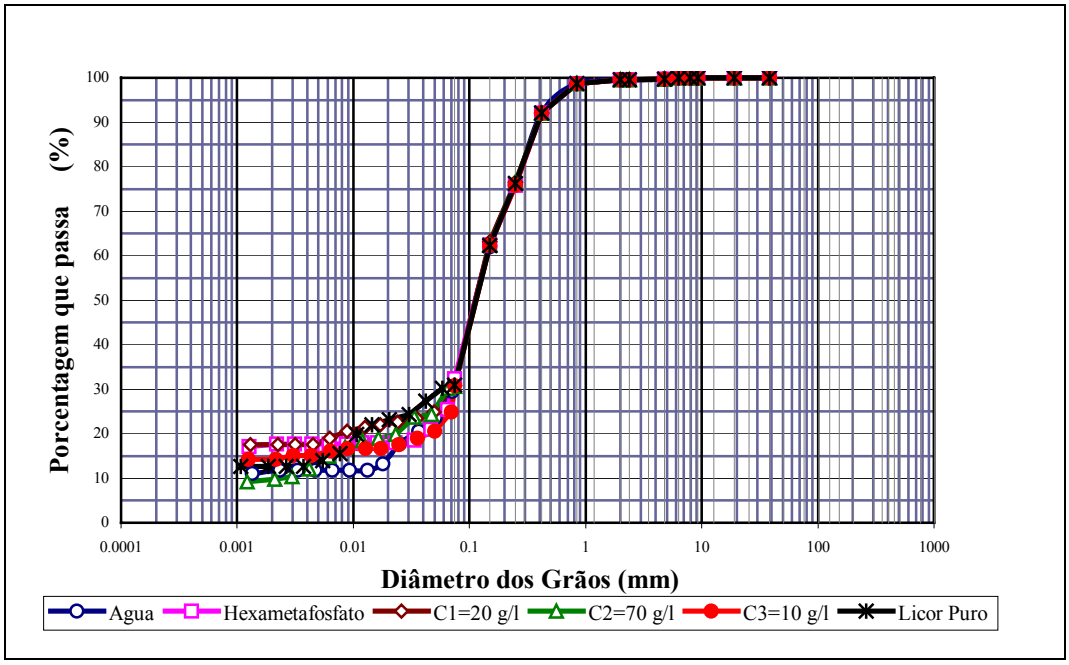


Figura 4.9 – Ensaio de Sedimentação com diferentes líquidos defloculantes.

- ***Densidade dos Grãos (Gs)***

São apresentados na tabela 4.11, os resultados de Gs para os diferentes materiais sem contaminar. O método utilizado para esta determinação foi o método do picnômetro, as determinações foram feitas com água.

Tabela 4.11 – Valores de Gs para os solos naturais.

Solo	Gs
E1 – CS3	2,670
E2 – CN3	2,666
E3 – CN2	2,655

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 0210661/CA

No caso dos materiais contaminados, esta determinação foi feita só no caso do Ensaio C_1, como pode observar-se na tabela 4.12. Já que o parâmetro não mostrou muita variação, não se considerou necessário repetir a análise para os outros materiais contaminados.

Tabela 4.12 – Valores de Gs para os solos do Ensaio C_1

Gradiente Hidráulico(*)	Gs
i = 1,8	2,673
I = 1,5	2,669
I = 1,0	2,670

(*)gradiente hidráulico usado no ensaio edométrico.

- ***Limites de Consistência***

Não foi possível determinar os limites de consistência com a material passante na peneira # 40, em nenhum dos materiais analisados.

4.3.2. Caracterização físico-química

- ***Determinação de pH e Condutividade Elétrica***

A determinação do pH e da condutividade elétrica foi feita concomitantemente, no caso do pH numa solução 1 : 1 (solo : água) e no caso da condutividade elétrica, no filtrado por vácuo dessa suspensão. O equipamento utilizado foi o mesmo que no caso do licor, e os procedimentos utilizados para estas determinações estão descritos no Anexo 1.

Nas tabelas 4.13, 4.14, 4.15 e 4.16, são apresentados os resultados para os materiais naturais, ou seja, sem contaminar, e para os materiais contaminados, provenientes dos ensaios edométricos.

Tabela 4.13 – Valores de pH e Condutividade Elétrica para os solos naturais.

Material	pH	Condutividade Elétrica (μs/cm)
E1 – CS3	4,40	333
E2 – CN3	4,35	91
E3 – CN2	5,23	138

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 0210661/CA

Tabela 4.14 – Valores de pH e Condutividade Elétrica – Ensaio C_1

Gradiente Hidráulico(*)	pH	Condutividade Elétrica (ms/cm)
i = 1,8	9,15	0,197
i = 1,5	9,05	0,395
i = 1,0	9,92	2,80
i = 0,5	9,83	4,08

(*)gradiente hidráulico usado no Ensaio Edométrico.

Tabela 4.15 – Valores de pH e Condutividade Elétrica – Ensaio C_2

Gradiente Hidráulico(*)	pH	Condutividade Elétrica (ms/cm)
i = 4,0	10,41	4,93
i = 2,0	10,59	4,39
i = 1,0	10,73	3,95
i = 0,5	10,33	3,93

(*)gradiente hidráulico usado no Ensaio Edométrico.

Tabela 4.16 – Valores de pH e Condutividade Elétrica – Ensaio C_3

Gradiente Hidráulico(*)	pH	Condutividade Elétrica (ms/cm)
i = 4,0	9,84	2,47
i = 2,0	9,94	2,75
i = 1,0	9,97	2,45
i = 0,5	9,96	2,82

(*)gradiente hidráulico usado no Ensaio Edométrico.

Das tabelas, pode-se observar que o solo natural é ácido; a passagem do licor faz com que o pH aumente, deixando-o alcalino. A condutividade elétrica também cresce após a percolação do licor. Mesmo assim, os valores apresentados são baixos, comportando-se o solo como um material pouco condutor.

- ***Capacidade de Troca Catiônica***

Segundo Yong (2001), o intercâmbio de cátions em solos acontece quando íons carregados positivamente (íons de contaminantes ou de sais) da água dos

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 0210661/CA

poros são atraídos para a superfície das frações argila do solo. A ocorrência deste processo se deve à necessidade de satisfazer a eletroneutralidade e a estequiometria. Os quesitos de eletroneutralidade requerem que os íons trocáveis devem satisfazer a deficiência de carga negativa não equilibrada que apresentam naturalmente as superfícies dos materiais argilosos. Estes íons trocáveis são denominados "cátions inter-cambiáveis ou cátions trocáveis". A capacidade de troca catiônica (CTC) indica a quantidade de cátions trocáveis que um solo possui, e é expressa em número de miliequivalentes de cátions por 100 gramas de solo (meq/100g solo).

Os cátions trocáveis predominantes nos solos são o cálcio e o magnésio. Em seguida, em menor quantidade, são achados o potássio e o sódio. Nos solos ácidos, os que predominam são o alumínio e o hidrogênio.

A capacidade de troca catiônica e a superfície específica são parâmetros importantes na descrição dos minerais argilosos. Valores típicos destes parâmetros disponíveis na literatura são apresentados nas tabelas 4.17 e 4.18.

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 0210661/CA

Tabela 4.17 - Valores de CTC e Superfície Específica para alguns minerais (Adaptado de Mitchell 76)

Mineral	Superfície Específica (m^2/g)	CTC (meq/100g)
Caulinita	10 – 20	3 – 15
Esmectita (sup. primária)	50 – 120	80 – 150
Esmectita (sup. sdária.)	~840	-
Ilita	65 – 100	10 – 40
Clorita	0 - 30	0
Quartzo	<1	0
Calcita	<1	0

Existem vários métodos para determinar a capacidade de troca catiônica dos solos, sendo o mais difundido o Método do Acetato de Amônio. Neste trabalho, utilizou-se o Método Compulsivo com $BaCl_2$. A escolha deste método fundamenta-se em que o acetato de amônio ($NH_{40}Ac$), em solos com conteúdo significativo de carbonatos, pode causar dissolução do $CaCO_3$, resultando em uma extração excessiva de Ca^{2+} pelo NH^{4+}. Como esta técnica permite medir a quantidade de Na^+, K^+, Ca^{2+} e Mg^{2+} no sobrenadante, este excesso de Ca^{2+} pode conduzir a valores maiores de CTC (Yong, 2001). Por outro lado, o solo em questão é um solo ácido, com conteúdo de Al^{3+} significativo, conteúdo este que

não é levado em conta pelo método do acetato de amônio para calcular o valor da CTC, podendo assim conduzir a uma avaliação errônea da CTC do solo. O procedimento de ensaio para determinar a CTC pelo método compulsivo é descrito no Anexo 1.

Tabela 4.18 – Valores de CTC e Superfície Específica para alguns minerais argilosos (Adaptado de Yong, 2001).

Mineral	Superfície Específica (m^2/g)	CTC (meq/100g)
Caulinita	10 – 15	5 – 15
Ilita	80 – 120	20 – 40
Clorita	70 – 90	20 – 40
Montmorilionita	800	80 – 100
Vermiculita	700	100 - 150

Independentemente das medições com o método compulsivo, também foi calculada a capacidade de troca catiônica pelo método de azul de metileno. Nas tabelas a seguir, ambos os valores são apresentados.

Tabela 4.19 – Valores de CTC para os solos naturais

Material	$BaCl_2$ (meq/100g)	Azul de Metileno (meq/100g)
E1 – CS3	4,60	9,00
E2 – CN3	3,25	9,00
E3 – CN2	3,85	6,00

Tabela 4.20 – Valores de CTC para os solos do Ensaio C_1

Gradiente Hidráulico (*)	$BaCl_2$ (meq/100g)	Azul de Metileno (meq/100g)
i = 1,8	4,15	8,00
i = 1,5	4,16	9,00
i = 1,0	3,89	9,00
i = 0,5	4,26	9,00

(*) gradiente hidráulico utilizado nos ensaios edométricos.

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 0210661/CA

Tabela 4.21 – Valores de CTC para os solos do Ensaio C_2

Gradiente Hidráulico (*)	$BaCl_2$ (meq/100g)	Azul de Metileno (meq/100g)
i = 4,0	4,41	8,00
i = 2,0	4,37	9,00
i = 1,0	4,24	5,00
i = 0,5	4,86	9,00

(*) gradiente hidráulico utilizado nos ensaios edométricos.

Tabela 4.22 – Valores de CTC para os solos do Ensaio C_3

Gradiente Hidráulico (*)	$BaCl_2$ (meq/100g)	Azul de Metileno (meq/100g)
i = 4,0	4,01	6,00
i = 2,0	4,14	8,00
i = 1,0	4,06	6,00
i = 0,5	3,69	6,00

(*) gradiente hidráulico utilizado nos ensaios edométricos.

Os valores de CTC achados pelo AM são elevados para o tipo de material estudado (material caulinítico). Os resultados do método compulsivo parecem mais adequados para o material analisado.

- ***Superfície Específica***

A superfície específica de um solo é uma medida que combina os efeitos do tamanho das partículas e sua esbelteza. A superfície específica é igual ao quociente entre a área superficial da partícula e sua massa.

Segundo Santamarina et al. (2002), a relevância da superfície especifica (Se) no comportamento do solo pode ser inferida comparando-se a magnitude das forças elétricas inter-partículas, F_{elec}, com o peso W da partícula.

$$\frac{Felec}{W} = Se\frac{(Rddl - Att)}{g} \qquad \text{Eq. 4-1}$$

onde g é a aceleração em m/s^2, e Rddl e Att são, respectivamente, as forças atuantes entre duas partículas (em N/m^2). No caso de solos não saturados, a relação entre o peso da partícula e a força capilar inter-partículas é relevante

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 0210661/CA

$$\frac{Fcap}{W} = Se^2\left(\frac{\xi}{w \times g}\right) \qquad \text{Eq. 4-2}$$

onde ξ é uma constante de proporcionalidade e w é o conteúdo de umidade gravimétrico. Estas equações mostram que quando Se cresce, a importância das forças elétricas e capilares, também cresce.

Em geral, à medida que o tamanho das partículas diminui, a superfície especifica cresce. A tabela 4.23 resume valores de superfície específica e de outras características para alguns argilo-minerais.

Tabela 4.23 - Propriedades de alguns argilo-minerais (Adaptado de Santamarina 2002).

Propriedade	Montmorilionita	Ilita	Caulinita
Se (m^2/g)	400 – 800	80 – 100	10 – 20
LL (%)	100 – 950	60 – 120	30 –110
LP (%)	50 – 100	35 – 60	25 – 40
Atividade	0,9 – 7	0,5 – 1,0	0,3 – 0,5

Existem vários métodos para determinar a superfície específica de um solo, desde a determinação direta pela medida visual, usando microscópio eletrônico, ou por procedimentos indiretos, através da medição da quantidade de material absorvido pela superfície do solo. A descrição do método direto, assim como as técnicas de cálculo da superfície específica, podem ser encontradas em Sposito (1994). Com relação, à técnica indireta, os materiais de impregnação podem ser de dois tipos: gasosos ou líquidos. Dentre os líquidos, duas técnicas estão bastante difundidas: o Método do Éter Monoetílico de Etileno Glicol (EMEG), e o Método do Azul de Metileno (AM).

Maiores detalhes sobre os métodos para determinar superfície específica podem ser encontrados em Perez e Casanova (1994), Santamarina et al. (2002), Higgs (1988) e Cerato e Lutenegger (2002).

Nesta dissertação optou-se pelo Método do Azul de Metileno, que, segundo Casanova (1986), é um método rápido, simples e de boa reprodutibilidade, além de permitir a medição concomitante da capacidade de

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 0210661/CA

troca catiônica (CTC). Os valores achados são apresentados nas tabelas 4.24, 4.25 e 4.26.

Tabela 4.24 – Valores de Superfície Específica para os solos naturais

Material	Superfície Específica (m^2/g)
E1 – CS3	70,24
E2 – CN3	70,24
E3 – CN2	46,83

Tabela 4.25 – Valores de Superfície Específica para os solos do Ensaio C_1

Gradiente Hidráulico(*)	Superfície Específica (m^2/g)
i = 1,8	62,43
i = 1,5	70,24
i = 1,0	70,24
i = 0,5	70,24

(*) gradiente hidráulico utilizado no ensaio edométrico.

Tabela 4.26 – Valores de Superfície Especifica para os solos do Ensaio C_2

Gradiente Hidráulico(*)	Superfície Específica (m^2/g)
i = 4,0	62,43
i = 2,0	70,24
i = 1,0	39,02
i = 0,5	70,24

(*) gradiente hidráulico utilizado no ensaio edométrico.

Tabela 4.27 – Valores de Superfície Específica para os solos do Ensaio C_3

Gradiente Hidráulico(*)	Superfície Específica (m^2/g)
i = 4,0	46,83
i = 2,0	62,43
i = 1,0	46,83
i = 0,5	46,83

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 0210661/CA

(*) gradiente hidráulico utilizado no ensaio edométrico.

Similarmente ao que acontece com os valores de CTC, os valores de superfície especifica pelo método de azul de metileno resultam elevados para a natureza do material analisado.

- ***Densidade de Carga Superficial (σ_s)***

A partir dos valores de capacidade de troca catiônica e de superfície específica, é possível calcular a densidade de carga superficial, usando a seguinte equação (Yong, 2001),

$$CTC = 10^5 \times \sigma_s \times Se$$

$$ou$$

$$\sigma_s = \frac{CTC}{\left(10^5 \times Se\right)}$$

onde CTC e Se estão expressas em meq/100 g e m^2/kg e, então, a σ_s fica em keq/m^2.

A densidade de carga superficial é igual à soma de todas as cargas atuantes na superfície da partícula.

Para os materiais analisados, os resultados foram os seguintes:

Tabela 4.28 – Valores de Densidade de carga para os solos naturais

Material	$\sigma_s^{(1)}$ (meq/m^2)	$\sigma_s^{(2)}$ (meq/m^2)
E1 – CS3	1,28 x 10^{-6}	6,55 x 10^{-7}
E2 – CN3	1,28 x 10^{-6}	4,69 x 10^{-7}
E3 – CN2	1,28 x 10^{-6}	8,22 x 10^{-7}

(1) com valores de CTC e Se calculados com o Método do AM, (2) com CTC calculado pelo método compulsivo e Se pelo AM.

Tabela 4.29 – Valores de Densidade de carga para os solos do Ensaio C_1

Gradiente Hidráulico(*)	$\sigma_s^{(1)}$ (meq/m^2)	$\sigma_s^{(2)}$ (meq/m^2)
i = 1,8	1,28 x 10^{-6}	6,65 x 10^{-7}
i = 1,5	1,28 x 10^{-6}	5,92 x 10^{-7}
i = 1,0	1,28 x 10^{-6}	5,54 x 10^{-7}
i = 0,5	1,28 x 10^{-6}	6,07 x 10^{-7}

(*) gradiente hidráulico utilizado no ensaio edométrico. (1) com valores de CTC e Se calculados com o Método do AM, (2) com CTC calculado pelo método compulsivo e Se pelo AM.

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 0210661/CA

Tabela 4.30 – Valores de Densidade de carga para os solos do Ensaio C_2

Gradiente Hidráulico(*)	$\sigma_s^{(1)}$ (meq/m^2)	$\sigma_s^{(2)}$ (meq/m^2)
i = 4,0	1,28 x 10^{-6}	7,06 x 10^{-7}
i = 2,0	1,28 x 10^{-6}	6,22 x 10^{-7}
i = 1,0	1,28 x 10^{-6}	1,09 x 10^{-7}
i = 0,5	1,28 x 10^{-6}	6,92 x 10^{-7}

(*) gradiente hidráulico utilizado no ensaio edométrico. (1) com valores de CTC e Se calculados com o Método do AM, (2) com CTC calculado pelo método compulsivo e Se pelo AM.

Tabela 4.31 – Valores de Densidade de carga para os solos do Ensaio C_3

Gradiente Hidráulico(*)	$\sigma_s^{(1)}$ (meq/m^2)	$\sigma_s^{(2)}$ (meq/m^2)
i = 4,0	1,28 x 10^{-6}	8,56 x 10^{-7}
i = 2,0	1,28 x 10^{-6}	6,63 x 10^{-7}
i = 1,0	1,28 x 10^{-6}	8,67 x 10^{-7}
i = 0,5	1,28 x 10^{-6}	7,88 x 10^{-7}

(*) gradiente hidráulico utilizado no ensaio edométrico. (1) com valores de CTC e Se calculados com o Método do AM, (2) com CTC calculado pelo método compulsivo e Se pelo AM.

- ***Conteúdo de Ferro e Alumínio***

Com o intuito de observar a possibilidade de lavagem de elementos tais como alumínio e ferro devido à passagem de licores cáusticos, foram determinados os conteúdos destes minerais nos solos naturais e após a contaminação. Isto foi feito por meio da digestão ácida das amostras de acordo com o procedimento EPA-3050 B – "Acid Digestion of Sediments, Sludges and Soils".

Os resultados obtidos são apresentados a seguir:

Tabela 4.32 – Conteúdo de Ferro e Alumínio para os solos naturais

Material	Alumínio (ppm)	Ferro (ppm)
E1 – CS3	243,33	6,141
E2 – CN3	169,31	5,272
E3 – CN2	121,90	3,500

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 0210661/CA

Tabela 4.33 – Conteúdo de Ferro e Alumínio para os solos do Ensaio C_1

Gradiente Hidráulico(*)	Alumínio (ppm)	Ferro (ppm)
i = 1,8	265,90	9,013
i = 1,5	287,60	8,019
i = 1,0	331,24	-
i = 0,5	240,20	10,573

(*) gradiente hidráulico utilizado no ensaio edométrico.

Tabela 4.34 – Conteúdo de Ferro e Alumínio para os solos do Ensaio C_2

Gradiente Hidráulico(*)	Alumínio (ppm)	Ferro (ppm)
i = 4,0	242,80	8,954
i = 2,0	269,60	33,457
i = 1,0	253,52	10,028
i = 0,5	283,49	9,439

(*) gradiente hidráulico utilizado no ensaio edométrico.

Tabela 4.35 – Conteúdo de Ferro e Alumínio para os solos do Ensaio C_3

Gradiente Hidráulico(*)	Alumínio (ppm)	Ferro (ppm)
i = 4,0	199,50	5,700
i = 2,0	221,10	7,100
i = 1,0	214,70	7,300
i = 0,5	188,20	6,500

(*) gradiente hidráulico utilizado no ensaio edométrico.

- ***Ataque sulfúrico***

O ensaio de ataque sulfúrico serve para determinar os teores de sílica, óxido de alumínio e ferro. Com estes valores, é possível obter as relações moleculares ki e kr. Os índices ki e kr são calculados pelas seguintes fórmulas:

$$k_i = \frac{\%SiO_2/60}{\%Al_2O_3/102} \qquad \text{Eq. 4-3}$$

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 0210661/CA

$$k_r = \frac{\%SiO_2/60}{\%Al_2O_3/102 + \%Fe_2O_3/160} \qquad \text{Eq. 4-4}$$

Os ensaios foram feitos com o solo natural E1-CS3, e deram os seguintes resultados:

Tabela 4.36 – Ensaio de Ataque Sulfúrico

Material	SiO_2 (%)	AlO_3 (%)	Fe_2O_3 (%)	k_i	k_r
E1 – CS3	4,2	5,5	2,4	1,30	1,02

4.3.3. Caracterização mineralógica

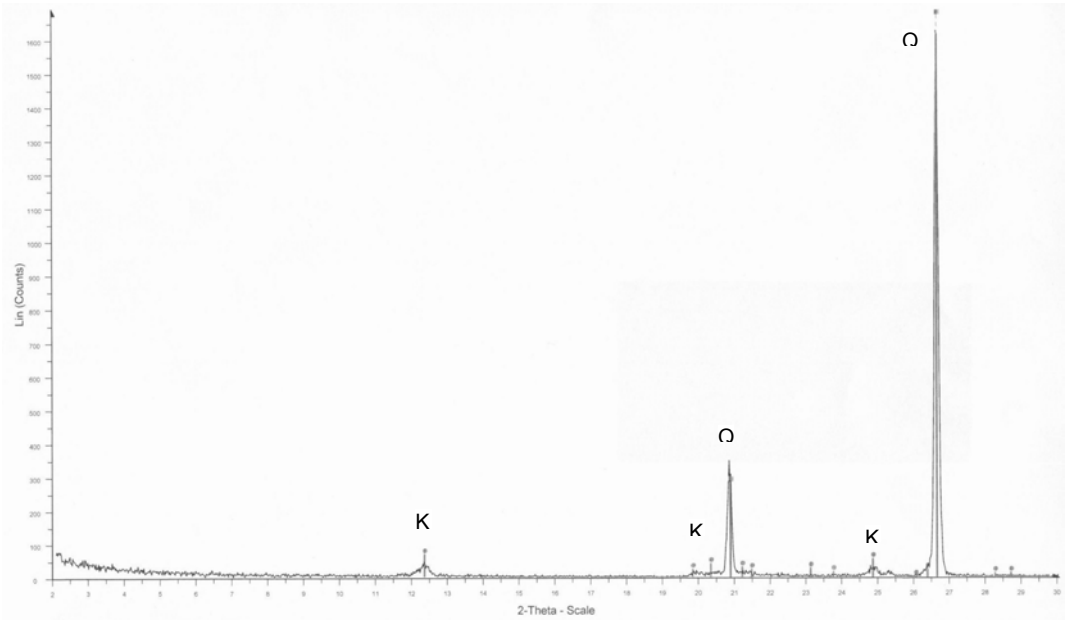
A caracterização mineralógica das amostras foi feita através dos seguintes ensaios,

- difração por Raios-X,
- observação na lupa,

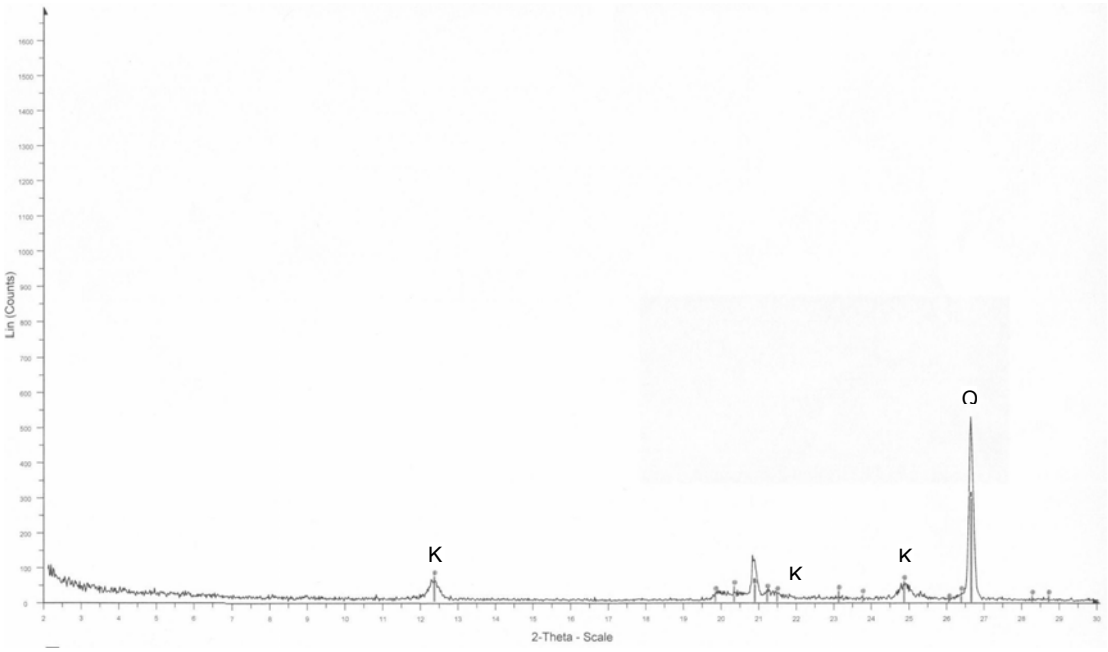
Para observar possíveis alterações na composição mineralógica dos solos pela percolação dos licores cáusticos, foram feitas estas análises com material natural, proveniente dos blocos indeformados (E2-CN3), e com material contaminado, amostras provenientes do ensaio edométrico C_2.

Análises mineralógicas das frações passantes nas peneiras #200 e #400 foram realizadas por meio de difração por raios X, no Departamento de Ciência dos Materiais e Metalurgia (DCMM) da PUC-Rio, com as amostras sendo preparadas no Laboratório de Geotecnia e Meio Ambiente da PUC-Rio. O equipamento utilizado foi o Difratômetro Siemens D5000, equipado com anodo de cobre (Cu), irradiação realizada no intervalo de 2 a 30º2θ. A velocidade de varredura da amostra no difratômetro foi de 0,02º2θ e tempo de leitura em cada passo de 1 segundo. A figura 4.10 mostra os resultados obtidos para o solo sem contaminar.

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 0210661/CA



a) Fração passante peneira #200



b) Fração passante peneira #400

Figura 4.10 – Difratograma dos solos do E2 – CN3 – Solo Natural

Com base nos dados mineralógicos e na relação molecular sílica/alumínio, verifica-se que o solo natural tem um comportamento laterítico.

Além dos ensaios citados, e procurando obter maiores informações sobre as mudanças que pode ter provocado a percolação do licor cáustico, foram feitas observações na lupa do Laboratório de Geotecnia e Meio Ambiente da PUC-Rio. Analizaram-se materiais provenientes dos ensaios de sedimentação e amostras

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 0210661/CA

não amolgadas do material natural, proveniente dos blocos indeformados e das amostras dos ensaios edométricos.

Como pode observar-se na figura 4.11, o material natural apresenta uma quantidade significativa de grãos de quartzo, de forma arredondada, cimentados fracamente por um material fino vermelho. Também se observa a presença de acumulações de manganês (material preto). A figura 4.12 mostra uma acumulação de quartzo rodeada por um círculo de manganês. O que resulta interessante nesta figura é que os grãos de quartzo encontram-se isolados e com pouca presença de material fino.

Das amostras de sedimentação, analisou-se o material retido na peneira # 200. Percebe-se claramente a forma arredondada dos grãos de quartzo. No material natural, os grãos apresentam-se limpos e individuais (Figura 4.13).

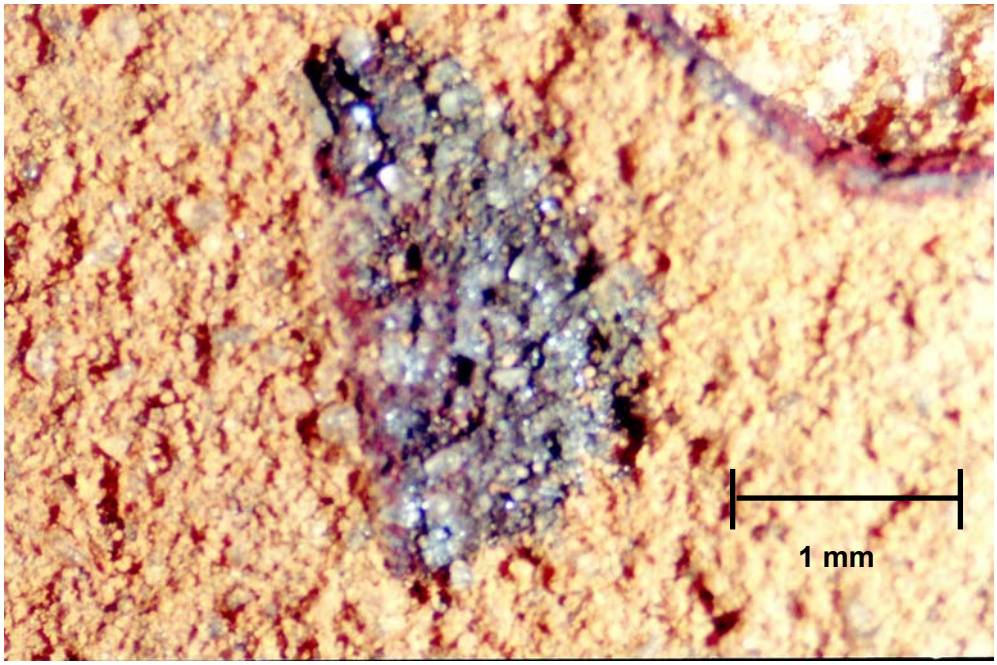


Figura 4.11 – Amostra Indeformada E2-CN3

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 0210661/CA

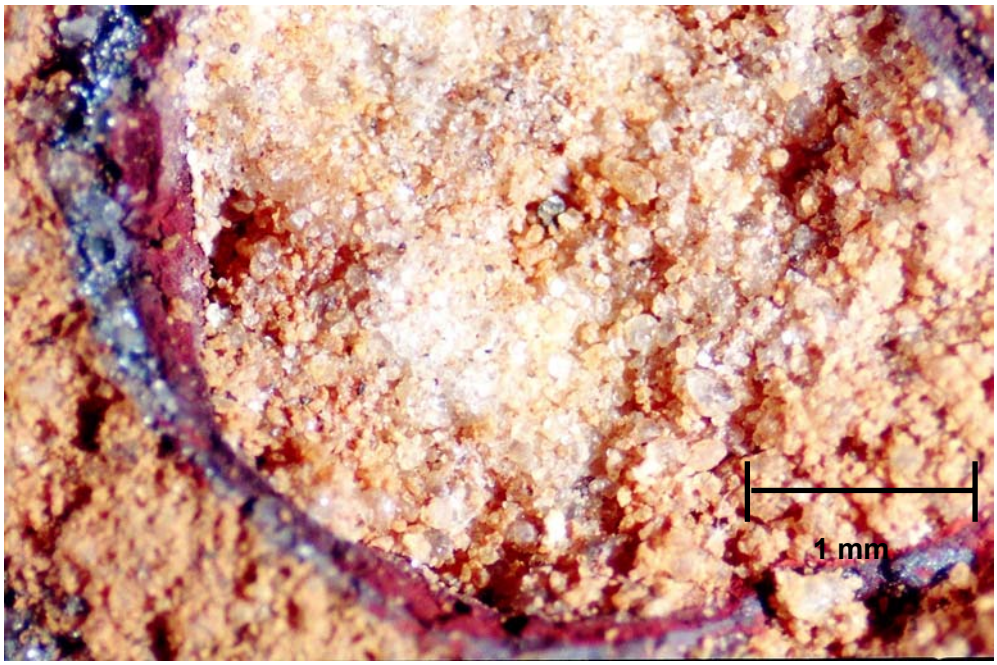


Figura 4.12 – Amostra Indeformada E2-CN3

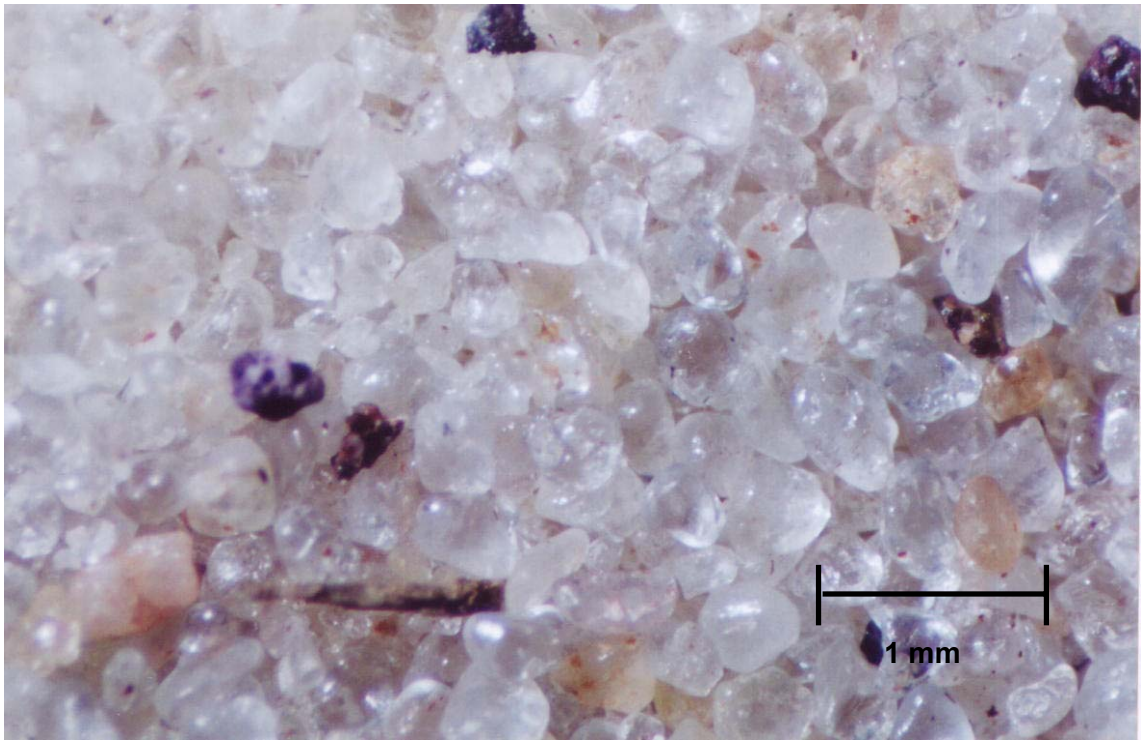


Figura 4.13 – Material sem contaminar E1-CS3, depois do ensaio de sedimentação.

Observando os materiais dos ensaios de sedimentação referentes aos ensaios edométricos C_2 e C_3 retidos na peneira #200, não se observaram diferencias entre os materiais naturais.

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 0210661/CA