

8 Interpretação e Análise dos resultados

8.1. Introdução

Este capítulo trata da análise dos resultados do programa experimental apresentado nesta dissertação. Os ensaios foram conduzidos visando fornecer elementos para contribuir para o entendimento dos efeitos da infiltração de soda cáustica nas características de colapsividade e de transporte de solutos do solo em estudo.

Nos capítulos anteriores, foram apresentados os ensaios realizados no programa experimental. Neste capítulo, os resultados destes ensaios são analisados e discutidos.

8.2. Ensaio de Caracterização

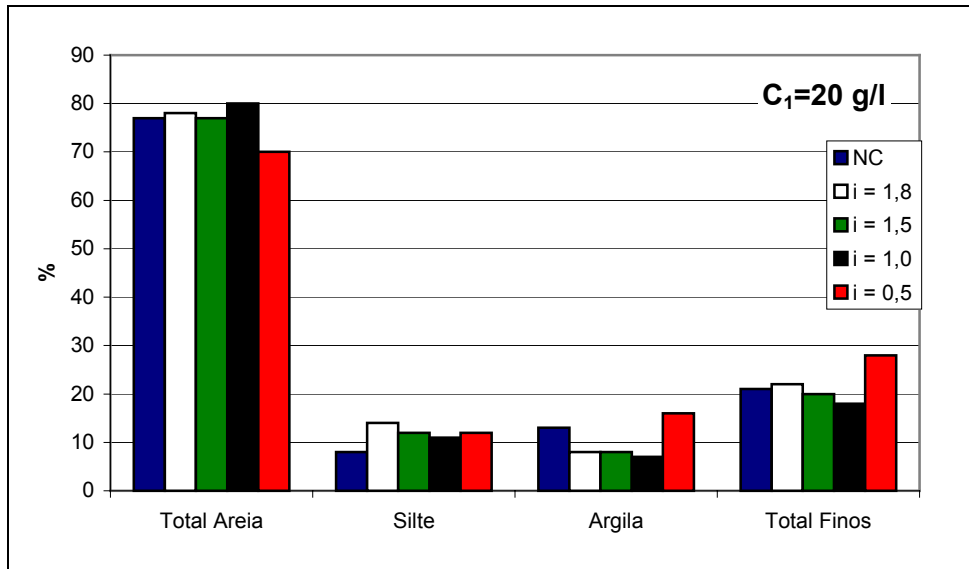
8.2.1. Caracterização Física

As figuras 8.1 a 8.3 resumem, a variação na granulometria, nos materiais dos ensaios edométricos Tipo 1.

Destas figuras pode observar-se que:

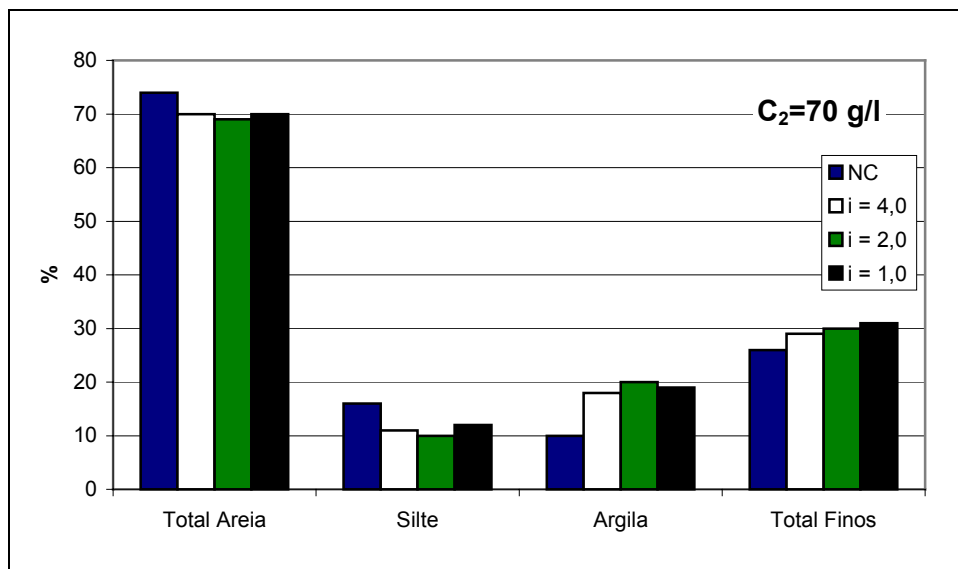
- No ensaio C_1 (figura 8.1), com concentração alcalina $C_1=20\text{g/l}$, a fração argila decresce na maioria dos ensaios, salvo no ensaio com o gradiente menor ($i=0,5$). Concomitantemente com esta queda no conteúdo de argila, há um crescimento no conteúdo de silte. Isto sugere que o licor na concentração cáustica de 20g/l se comporta como um flocculante.
- No ensaio C_2 e no ensaio C_3 (figuras 8.2 e 8.3), com concentração alcalina de $C_2=70\text{ g/l}$ e $C_3=10\text{ g/l}$, respectivamente, a fração argila cresce em todos os ensaios, a fração silte tem uma queda e, o

conteúdo de finos total tem um pequeno crescimento. No ensaio C_2 (figura 8.2) o licor se comporta como defloculante e, quanto menor é o gradiente maior é a porcentagem de finos. No ensaio C_3 (figura 8.3), que corresponde com a menor concentração (10 g/l), há um crescimento da fração argila que é independente do gradiente hidráulico.



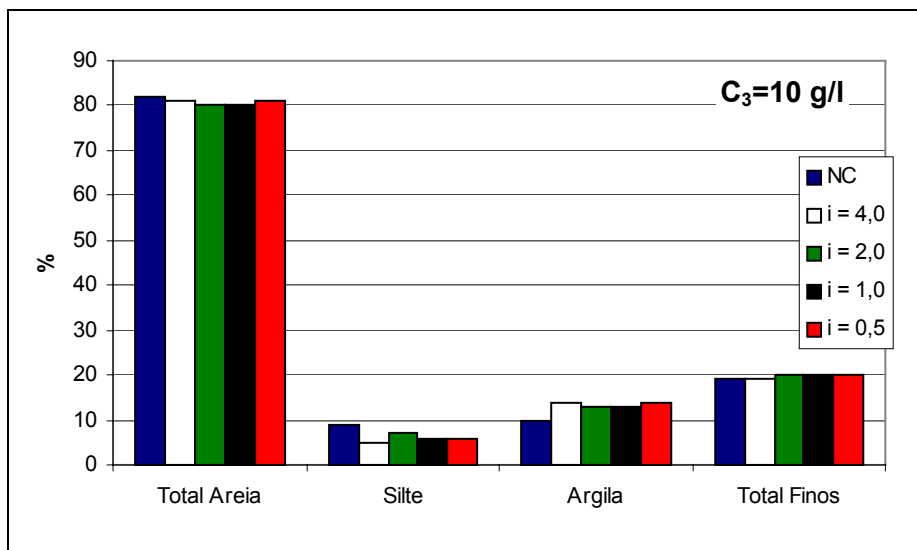
NC=não contaminado, i =gradiente hidráulico utilizado no ensaio edométrico.

Figura 8.1 – Variação da granulometria - Ensaio C_1



NC=não contaminado, i =gradiente hidráulico utilizado no ensaio edométrico

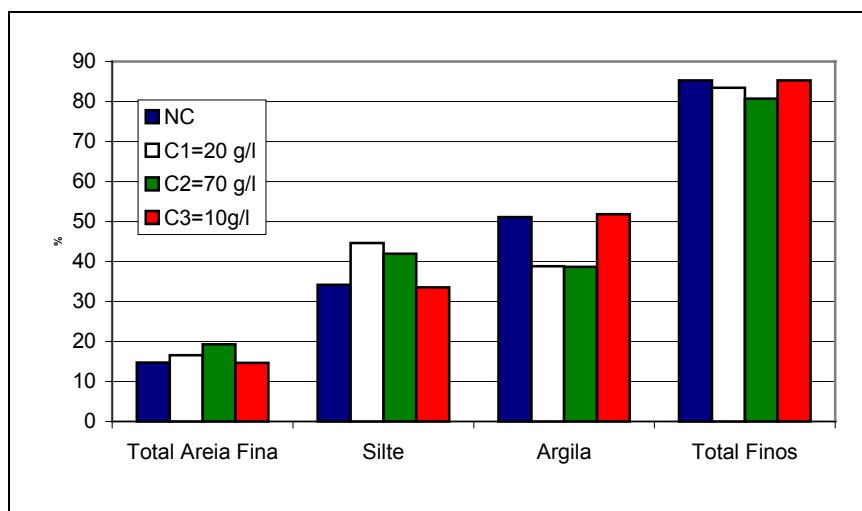
Figura 8.2 – Variação da granulometria - Ensaio C_2



NC=não contaminado, i=gradiente hidráulico utilizado no ensaio edométrico

Figura 8.3 – Variação da Granulometria – Ensaio C₃

A figura 8.4 apresenta a comparação das distintas frações granulométricas para o Ensaio Tipo 3. O material não contaminado e o material ensaiado com a concentração menor (C₃), apresentam o mesmo comportamento. Já os materiais ensaiados com a concentração C₁ e C₃ têm um crescimento importante da fração silte e areia fina com respeito ao material sem contaminar. A porcentagem total de finos sofre pouca variação, porque a fração argila sofre uma queda de valor similar ao incremento de silte e areia. O licor cáustico nas concentrações de 20 e 70 g/l tem efeito floculante, já na concentração de 10g/l o efeito é defloculante.



NC=não contaminado, C=concentração alcalina utilizada no ensaio edométrico.

Figura 8.4 - Variação da Granulometria – Ensaio Tipo 4

Da utilização do licor como defloculante, no procedimento de sedimentação, se observa que em todas as concentrações testadas, o licor se comporta como

um material defloculante, salvo na concentração menor ($C_3 = 10\text{g/l}$). Para a concentração de 70g/l , o efeito flocculante do licor é mais marcado, um efeito similar tem também o licor puro (concentração cáustica de 154g/l). O que indica que, com o crescimento da concentração, o efeito defloculante (em termos de finos totais) do licor cáustico também cresce. Na figura 8.5 e são mostradas estas características.

Não é possível comparar os resultados destes ensaios com os Ensaios Tipo 1 e Tipo 3, porque são ensaios diferentes. Neste caso o ensaio é um ensaio de sedimentação tradicional, onde um mesmo material (solo E2-CN3) é testado utilizando distintos materiais como defloculantes, entre eles licor cáustico nas concentrações C_1 , C_2 e C_3 . O tempo de contacto entre, solo e licor, é menor de 24 horas, e se aplica dispersão mecânica as misturas antes de começar o ensaio de sedimentação. Entretanto, os ensaios Tipo 1 e Tipo 3 são ensaios de percolação de licor cáustico a diferentes concentrações, baixo determinados gradientes e com um tempo de contato entre o solo e o licor de 15 a 60 dias.

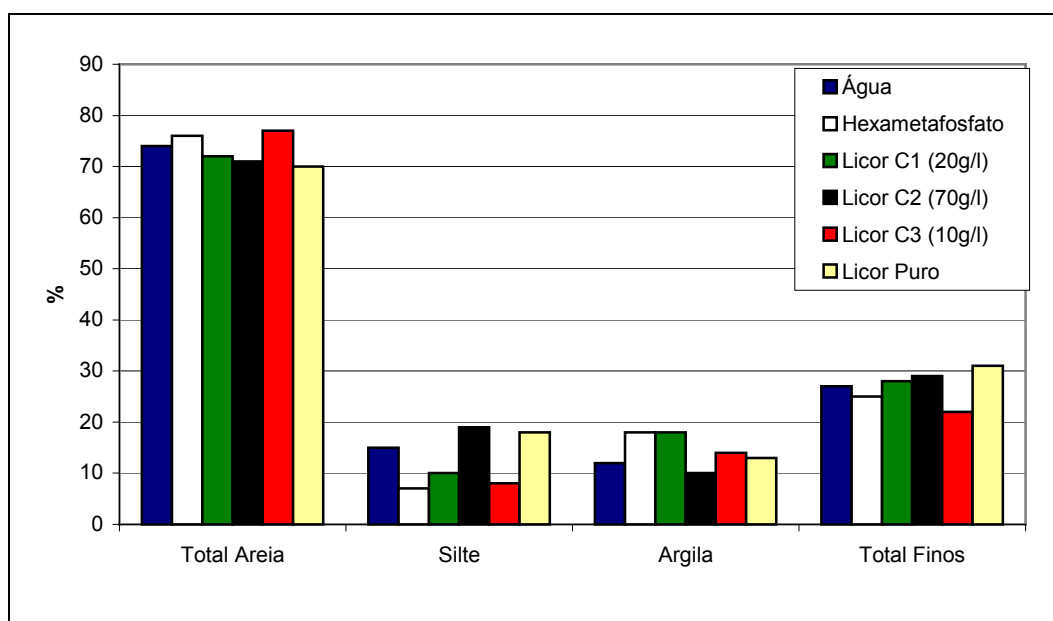


Figura 8.5 – Ensaios de Sedimentação com diferentes líquidos defloculantes.

8.2.2. Caracterização Físico-Química

- *pH e condutividade elétrica*

O pH do solo aumenta com a percolação do licor (figura 8.6), sendo que o maior incremento se dá para a concentração maior (70 g/l). O gradiente

hidráulico não tem influência no valor final do pH, e na figura 8.6 estão informados valores médios. Nesta figura, "natural" identifica o valor de pH do solo ao início do ensaio edométrico e, "contaminado", o valor ao final do ensaio.

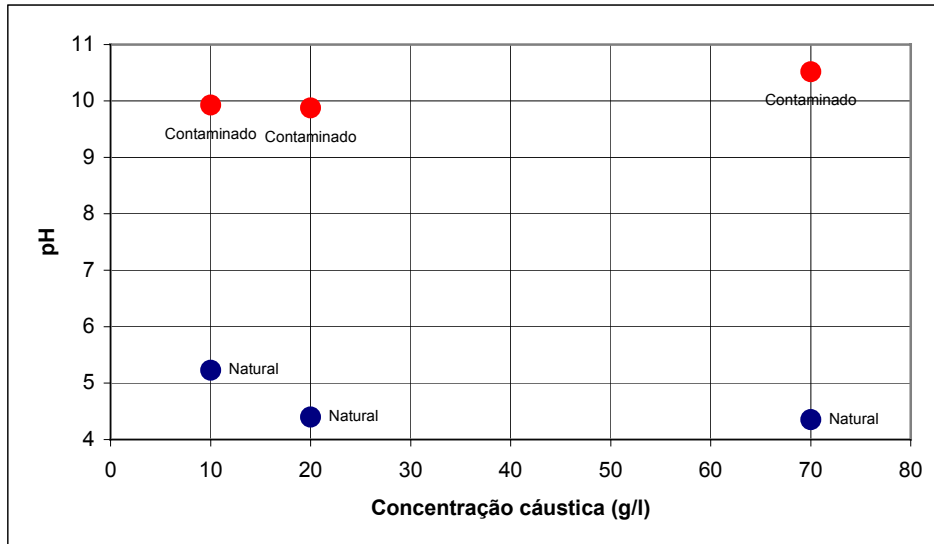


Figura 8.6 – Variação do pH do solo

A condutividade elétrica também cresce com a concentração do licor, atingindo os valores maiores para a concentração de 70g/l, também esta mudança é independente do valor de gradiente hidráulico. Na figura 8.7 se mostra este comportamento.

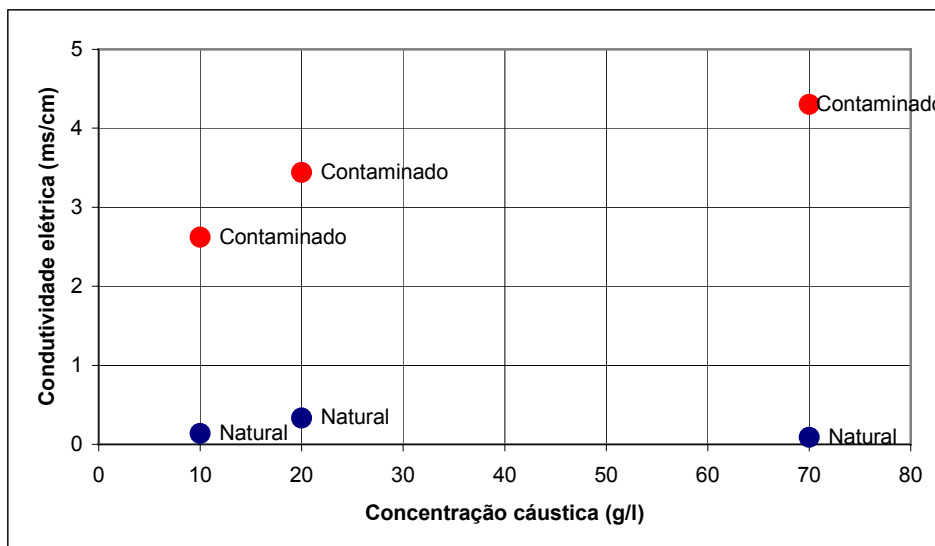


Figura 8.7 – Variação da condutividade elétrica do solo

- **Capacidade de Troca Catiônica, e Superfície Específica.**

A capacidade de troca catiônica mostra um comportamento que depende da concentração cáustica do licor. A valor do material natural é da ordem de 3 a 5 meq/100g, coerente com o mineral argílico presente (caulinita). O material contaminado sofre uma pequena mudança, mas continua na mesma ordem de grandeza, o que indica que o material argiloso não foi modificado pela passagem do licor cáustico, como confirmam os ensaios mineralógicos.

Dois fenômenos poderiam explicar esta pequena mudança no valor de CTC, uma que é coerente com os dados de mineralogia (Item 8.2.3) que indicam que não há mudanças na caulinita. A segunda razão poderia estar em uma mudança no conteúdo de amorfos do solo. Esta segunda hipótese não pode ser confirmada, já a que não foram feitos análises dos conteúdos de amorfos nas amostras.

Já que o gradiente hidráulico não tem influência no valor de CTC, na figura 8.8 são informados valores médios.

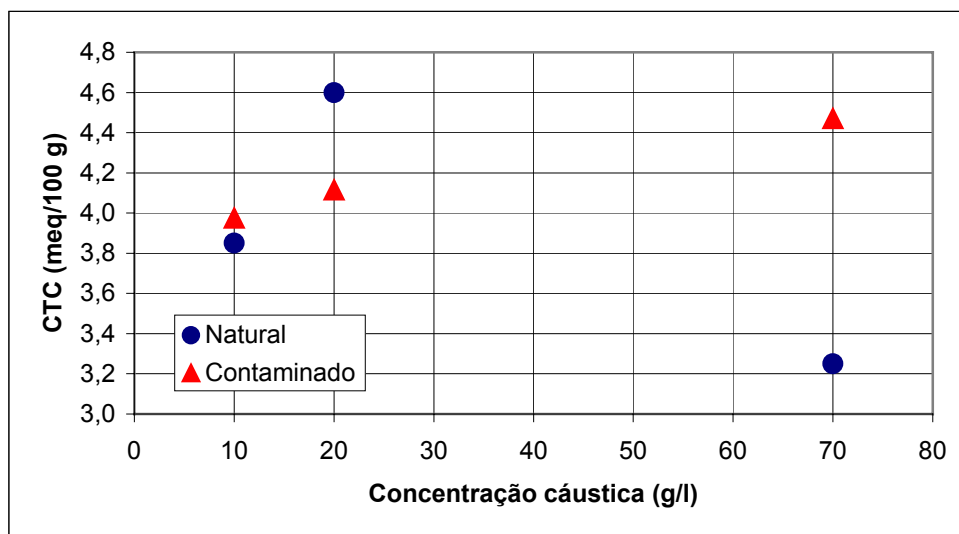


Figura 8.8 – Variação da capacidade de troca catiônica

A superfície específica não sofre muita variação com a percolação do licor, e não mostra um comportamento definido. Os valores achados parecem um pouco elevados para o material estudado, o mesmo acontece com os valores de capacidade de troca catiônica achados com o método AM.

Tomando em consideração os valores de troca catiônica calculados com o método compulsivo, seria de esperar-se um comportamento similar ao apresentado pelo valor de troca catiônica com os valores de superfície

específica, mas isto não foi detectado pelos ensaios realizados, possivelmente porque o método de ensaio utilizado (Método AM) não consegue obter mudanças tão pequenas de superfície específica.

- **Conteúdo de Ferro e Alumínio**

Os valores de ferro e alumínio nos solos cresceram com a passagem do licor, sendo que o maior ganho se dá para a concentração maior (70g/l).

A mudança de pH do meio pode ter contribuído para a precipitação dos elementos, que atuam como materiais de cimentação, e estão presentes no licor cáustico.

Estes aumentos de conteúdo de ferro e alumínio são coincidentes com a queda dos conteúdos de ferro e alumínio nos licores percolados.

Nas figuras 8.9 e 8.10 estão apresentados os valores médios de ferro e alumínio no solo.

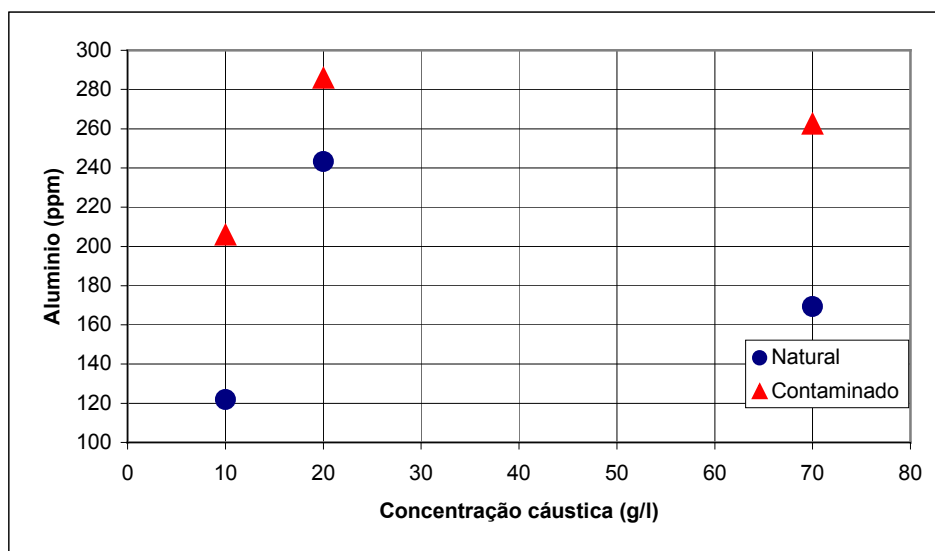


Figura 8.9 – Variação do conteúdo de alumínio nos solos.

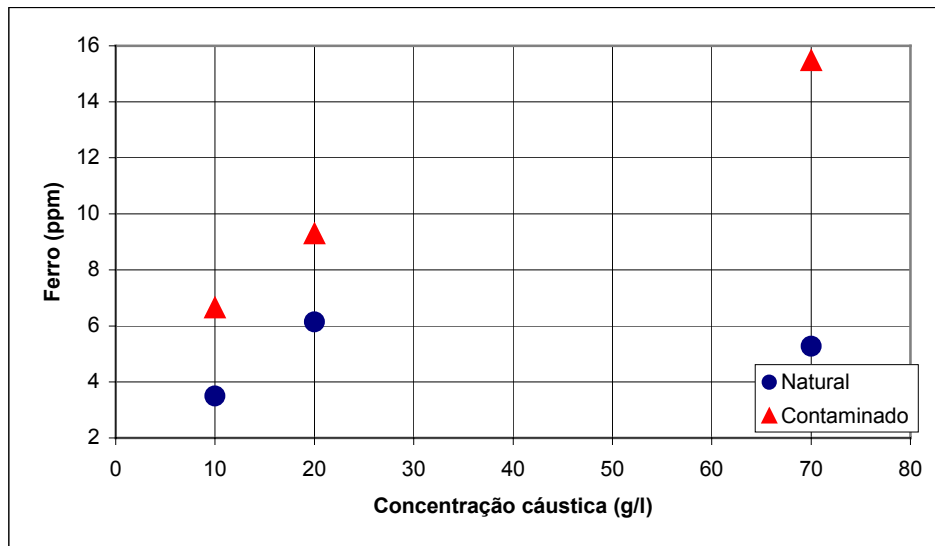


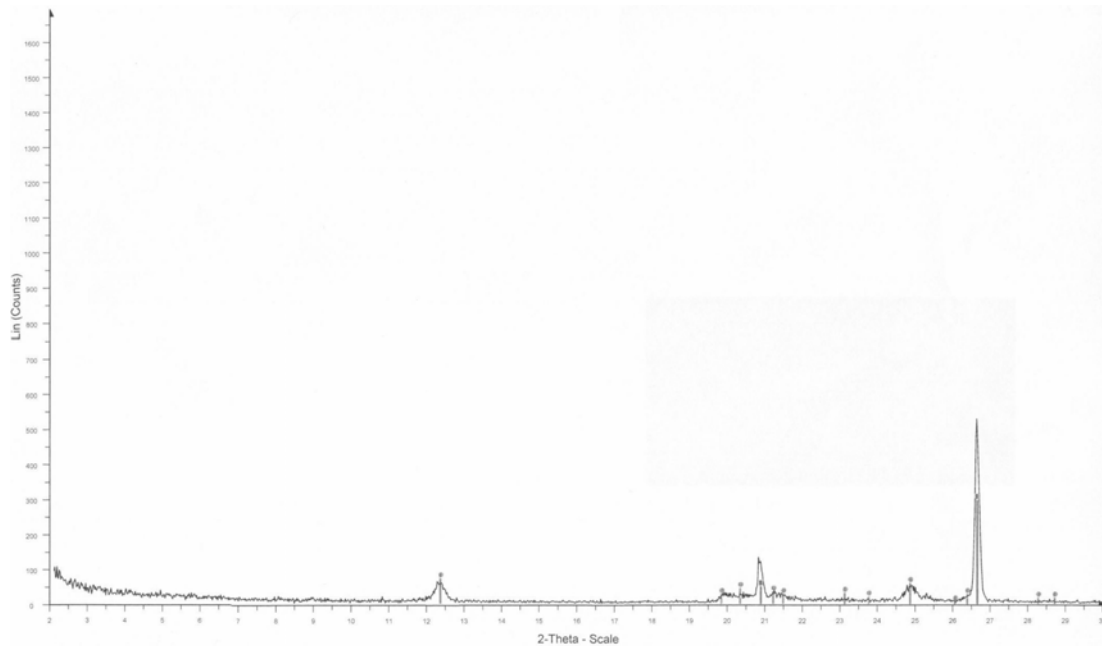
Figura 8.10 – Variação do conteúdo de ferro nos solos.

8.2.3. Caracterização mineralógica

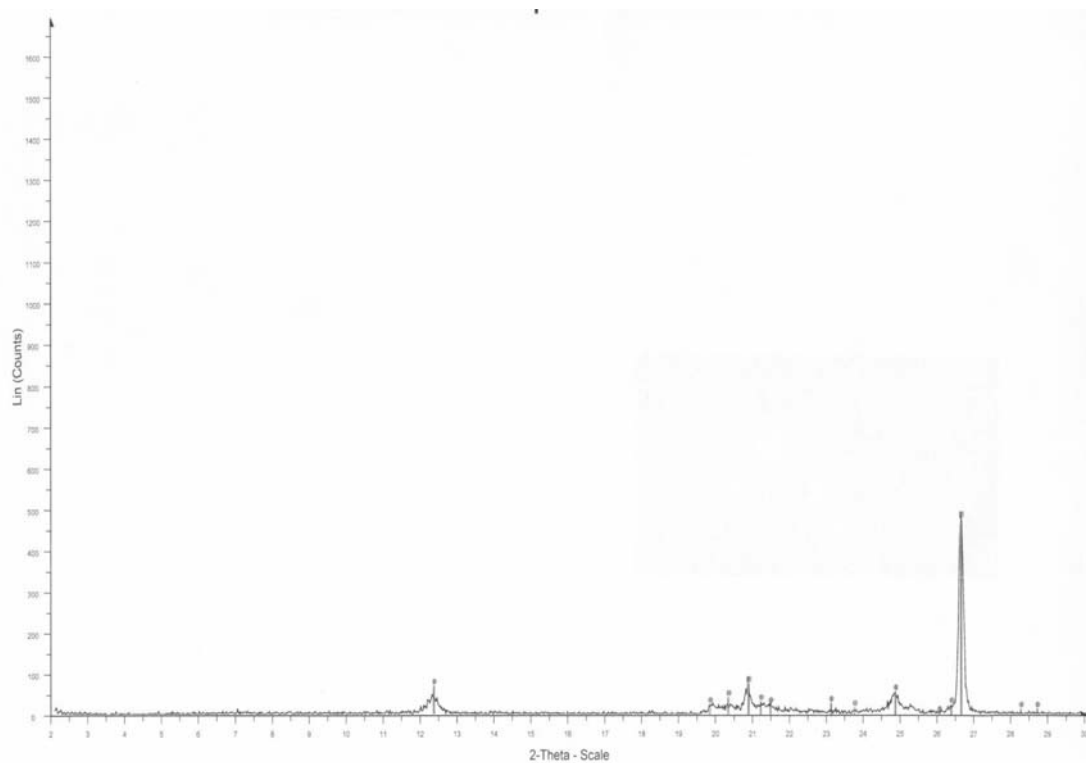
Da análise dos difratogramas e da observação dos materiais, se pode concluir que a percolação do licor não provoca alterações no mineral argílico caulinita, há uma diminuição nos picos, mas não se observa nenhum elemento que possa indicar mudanças no mineral. Isto também é confirmado pelos valores de CTC.

Os difratogramas foram feitos com amostras de material natural (E2-CN3) e o material contaminado do ensaio com concentração C_2 (70 g/l), da fração passante na peneira #200 e na #400.

A seguir são apresentados os difratogramas da fração passante na peneira #400 para o material natural (figura 8.11-a) e para o material proveniente do ensaio edométrico Tipo 1- C_2 , com gradiente hidráulico de $i=1,0$ (figura 8.11-b). Os restantes difratogramas estão apresentados no Apêndice 2.



a) Solo natural (Fração passante peneira #400)



b) Solo contaminado (Fração passante peneira #400)

Figura 8.11 – Difratoograma do solo E2–CN3 – Ensaio C₂

Da observação das amostras naturais amolgadas (lavados do ensaio de sedimentação) na lupa, se vê que o solo natural tem uma grande quantidade de grãos de quartzo e que estes têm uma forma arredondada, com um mínimo de área exposta por unidade de volume, proporcionando uma baixa coerência entre eles.

Nas amostras contaminadas, não foram observadas mudanças. O solo continua apresentando uma quantidade significativa de grãos de quartzo. Aparentemente estes grãos não sofreram ataque do licor.

Na amostra contaminada, retida na peneira #200, que corresponde á concentração $C_1(20\text{g/l})$ com $i=1,0$, os grãos apresentam uma cor avermelhada e existem grãos de quartzo com cimentação (Figura 8.12).

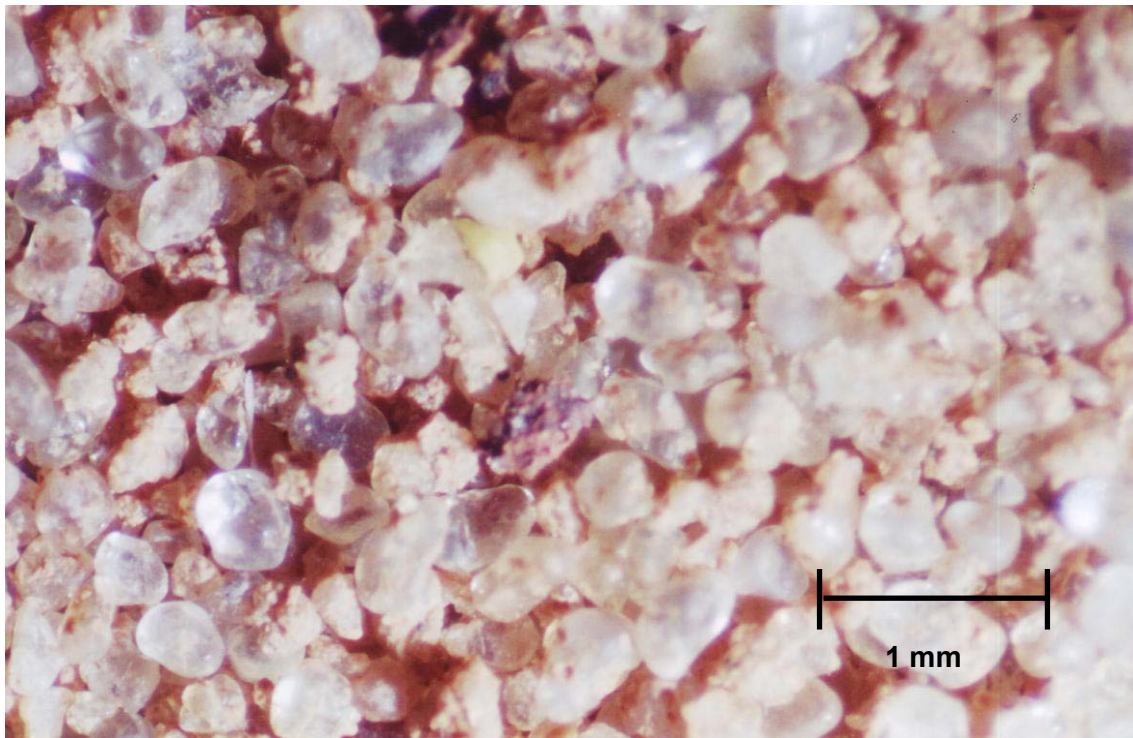


Figura 8.12 – Material Contaminado E1-CS3 – Ensaio $C_1(i=1,0)$, depois do ensaio de sedimentação.

Da observação dos outros materiais contaminados dos ensaios de sedimentação, ensaios edométricos C_2 e C_3 retidos na peneira #200, não se observaram diferenças entre os materiais contaminados e não contaminados.

No caso do ensaio edométrico Tipo 3, que foi efetuado só com fração passante na peneira #200 do solo E1-CS3, e com concentrações iguais a C_1 , C_2 e C_3 , observaram-se comportamentos diferenciados segundo a concentração cáustica utilizada. Neste caso, o material analisado foi o material retido na peneira #400, após o ensaio de sedimentação. Para as concentrações C_1 (20g/l) e C_2 (70 g/l), existe uma floculação de material de cor vermelha, presumivelmente material argiloso cimentado por hidróxido de ferro e alumínio, mostrado nas figuras 8.13 e 8.14. Já para a concentração C_3 (10 g/l) este fenômeno não se observa.

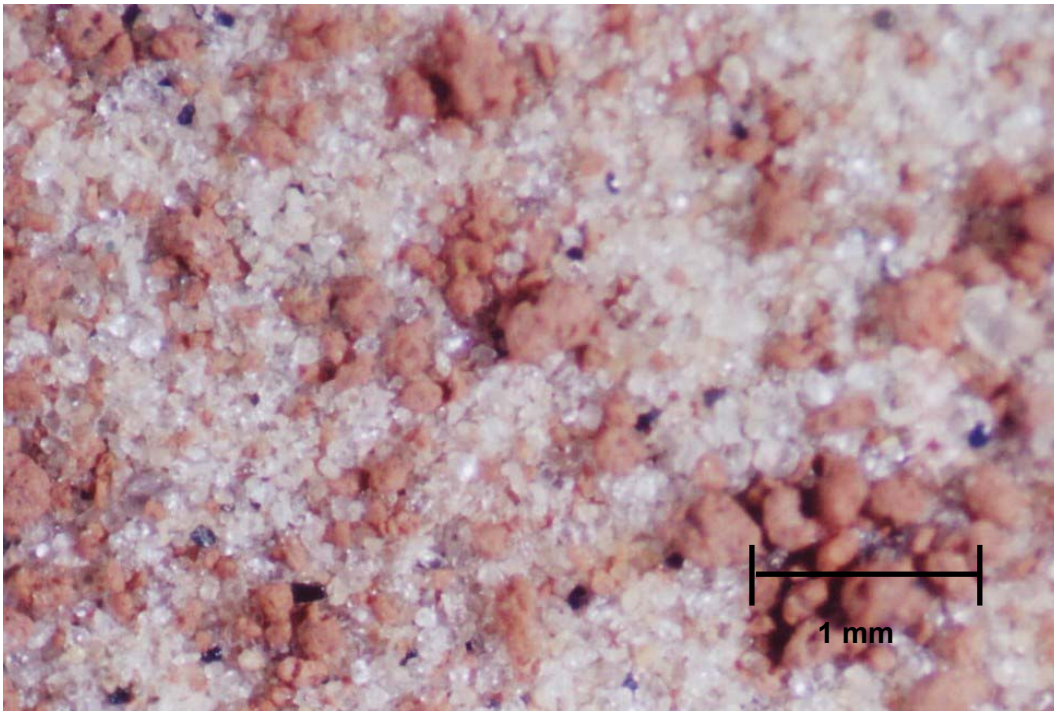


Figura 8.13 – Material contaminado Ensaio 4, C₁, depois do ensaio de sedimentação (material retido na #400).

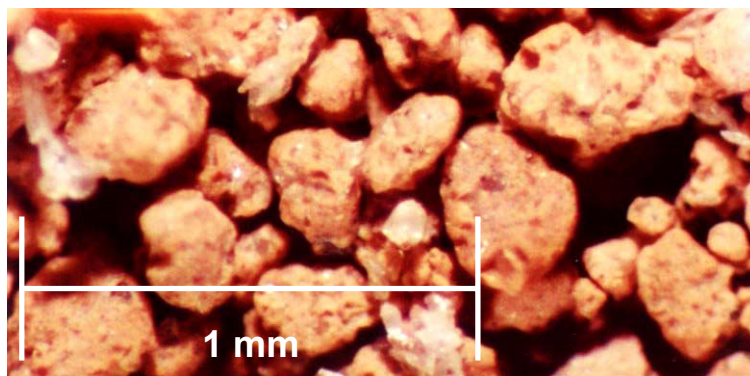


Figura 8.14 - - Material contaminado Ensaio 4, C₁, depois do ensaio de sedimentação (material retido na #400).

Da observação das lâminas petrográficas na lupa, comparando entre os materiais natural e contaminado, observa-se neste último um pequeno aumento dos vazios maiores, e alguma concentração de material precipitado de cor vermelha. No material sem contaminar, há uma maior quantidade de vazios pequenos e o material vermelho cimentante está distribuído mais uniformemente, mesmo assim existem algumas concentrações de material vermelho.

8.3. Ensaio de Adensamento e Colapsividade

Os ensaios mostraram que o solo analisado é colapsível. Ele sofre variações de volume com a saturação com água e, quando percolado com o licor, novamente sofre variações de volume.

- **Ensaio Tipo 1**

Nas figuras 8.15 a 8.17, estão mostrados as porcentagens de variação de índice de vazios correspondente a cada etapa de ensaio, *saturação* com água e, percolação com licor.

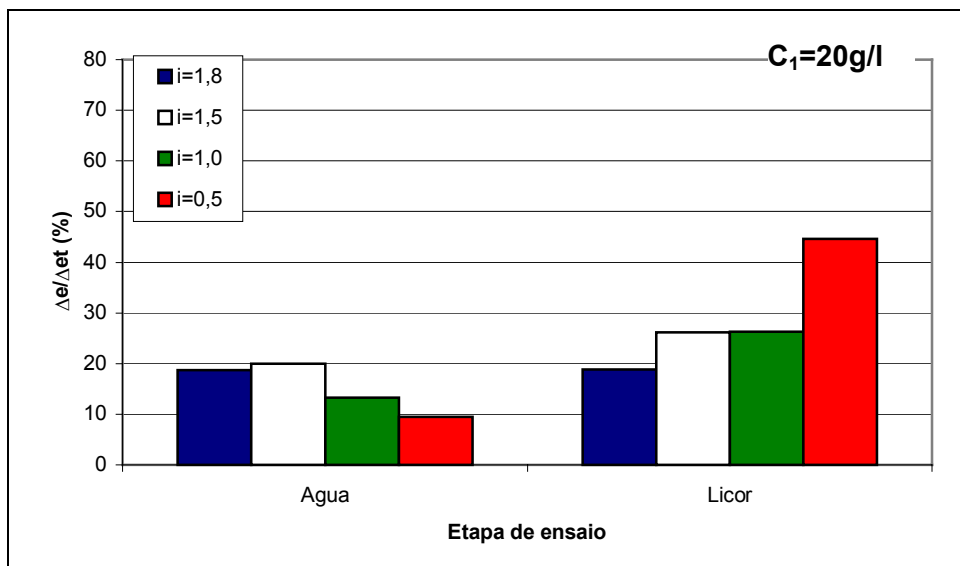


Figura 8.15 - % de Variação de índice de vazios correspondente a cada etapa de ensaio – Ensaio C_1

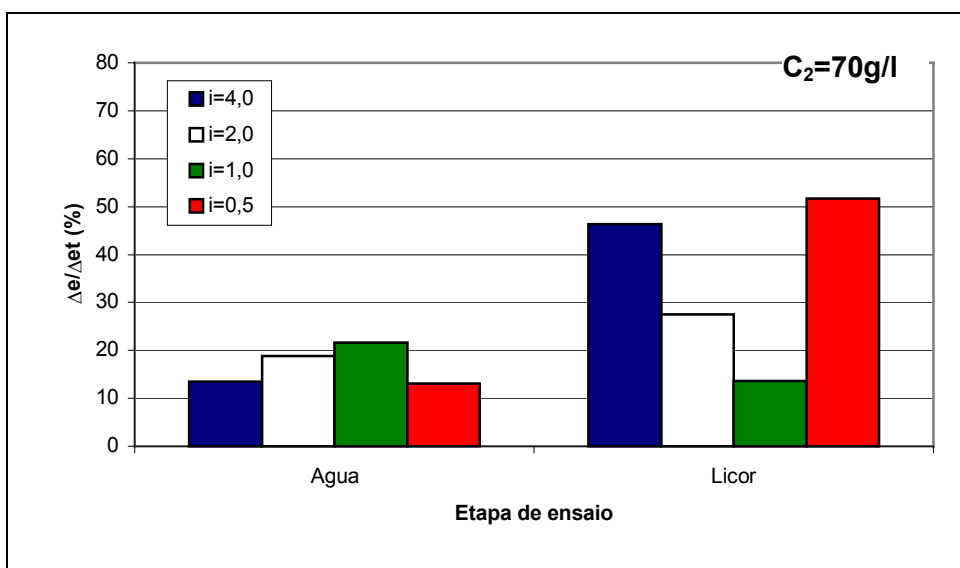


Figura 8.16 - % de Variação de índice de vazios correspondente a cada etapa de ensaio – Ensaio C_2

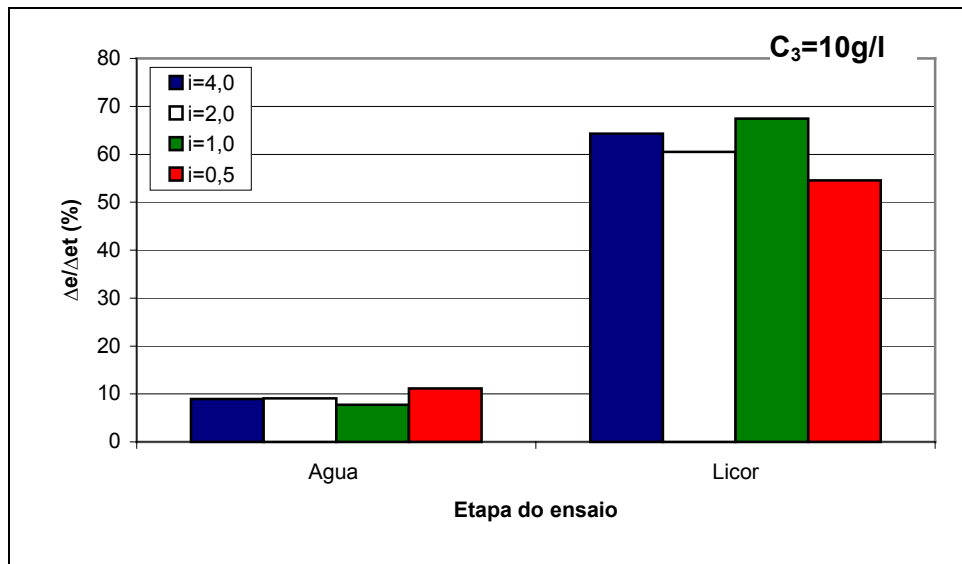


Figura 8.17 - % de Variação de índice de vazios correspondente a cada etapa de ensaio – Ensaio C_3

Para todas as concentrações, as porcentagens de variação de índice de vazios correspondentes à percolação com o licor cáustico são maiores que as correspondentes à etapa de *saturação* com água. E das variações correspondentes ao licor, para as três concentrações, o maior recalque corresponde ao menor gradiente hidráulico ($i=0,5$), exceto no ensaio C_3 .

Em todos os ensaios individuais, mostrados no Capítulo 5, na etapa de percolação com o licor cáustico, tanto o índice de vazios como o coeficiente de permeabilidade experimentam uma queda inicial para os primeiros volumes de vazios percolados.

No caso do índice de vazios, esta queda, para todos os ensaios, aconteceu com a percolação de menos de dois volumes de vazios. E, a partir deste momento, ficava quase constante, estabilizando-se as leituras de deslocamento vertical. No caso do coeficiente de permeabilidade, esta queda nos primeiros volumes de vazios percolados é seguida por um aumento do valor à medida que aumentava o volume de licor percolado. Estes comportamentos apresentam-se em todos os ensaios independentes do gradiente hidráulico. A concentração do licor é a que impõe a velocidade desta queda, sendo mais rápida para a concentração maior ($C_3=70$ g/l).

Com o intuito de comparar as variações individuais de cada ensaio, são feitas, a seguir, análises de vários parâmetros.

Primeiro, nas figuras 8.18 a 8.19, se apresenta uma comparação entre as variações totais de índice de vazios para a etapa de percolação de licor. Nas

figuras, a comparação está feita para o menor gradiente hidráulico ($i=0,5$), já que os maiores recalques aconteceram para este gradiente.

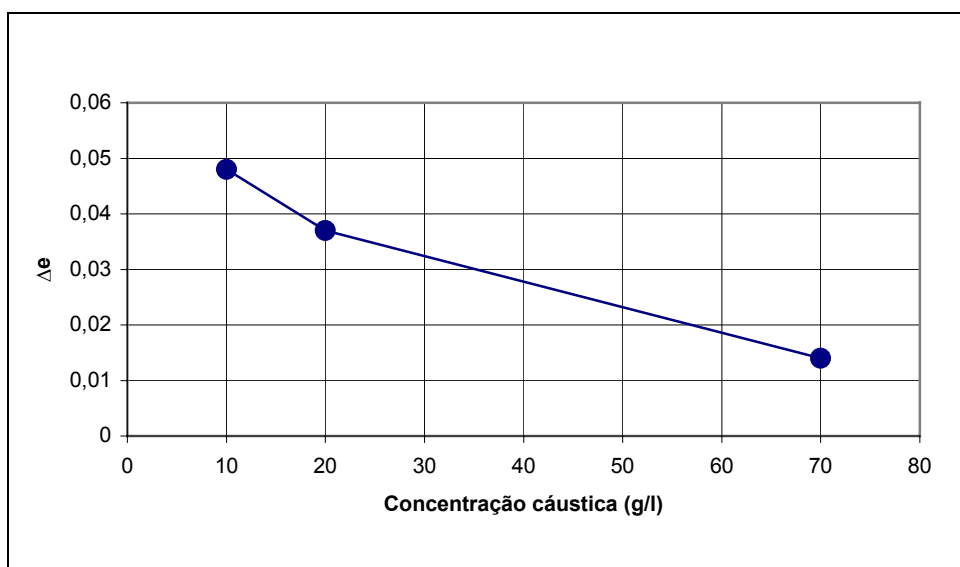


Figura 8.18 – Variação total do índice de vazios.

O maior valor de Δe corresponde com a concentração de 10 g/l, e este valor decresce com o crescimento na concentração cáustica, de uma maneira aproximadamente linear.

Uma outra comparação possível é a mudança na relação normalizada e_f/e_0 para os distintos ensaios, e_f representa o valor do índice de vazios ao fim da etapa de percolação com licor, e e_0 , o valor do índice de vazios ao fim da etapa de saturação com água.

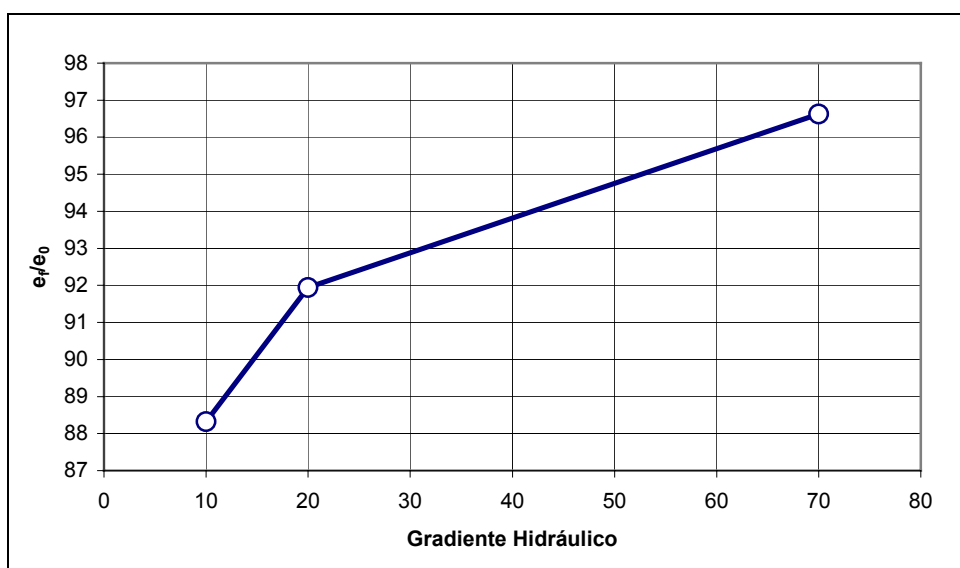


Figura 8.19 – Variação de e_f/e_0 para os distintos ensaios.

A figura 8.19 confirma o mostrado na figura 8.18, a maior variação no índice de vazios correspondendo com a menor concentração.

Concomitantemente com a mudança no índice de vazios, há uma mudança do coeficiente de permeabilidade das amostras, os sub-índices 0 e f têm o mesmo significado que no caso de e.

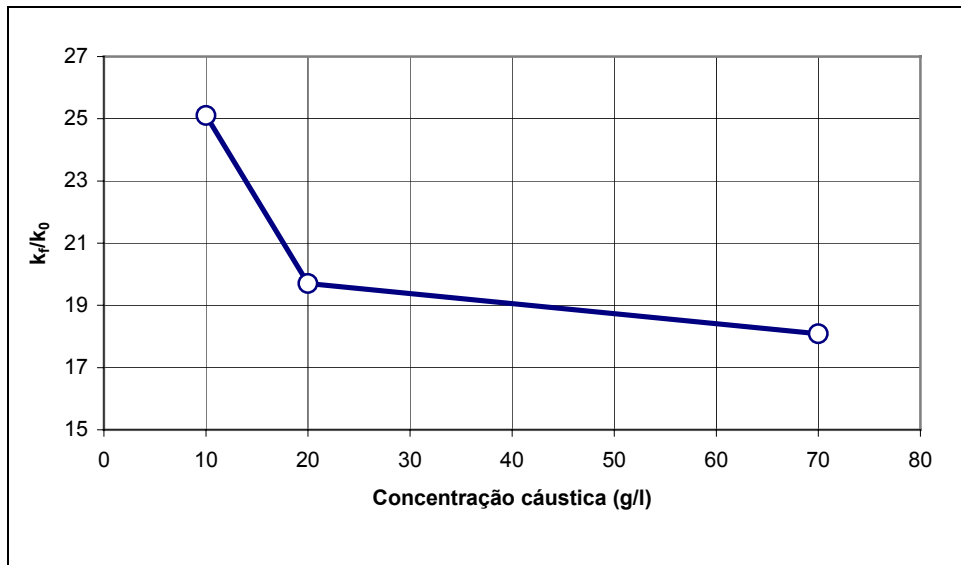


Figura 8.20 – Variação da relação k_f/k_0

Para o coeficiente de permeabilidade, a maior queda se dá para a concentração maior (70 g/l). A porcentagem de redução do coeficiente de permeabilidade cresce com a concentração.

- **Ensaio Tipo 2**

No caso do ensaio Tipo 2, onde se percolou água após a passagem do licor na concentração de 20 g/l, a redução do índice de vazios e do coeficiente de permeabilidade é ainda mais brusca que no caso dos ensaios Tipo 1, e praticamente imediata. Isto foi mostrado nas figuras 5.10 e 5.11.

Na figura 8.21, se apresentam as porcentagens de variação de volume de vazios total para cada etapa do ensaio – percolação com água, licor e água.

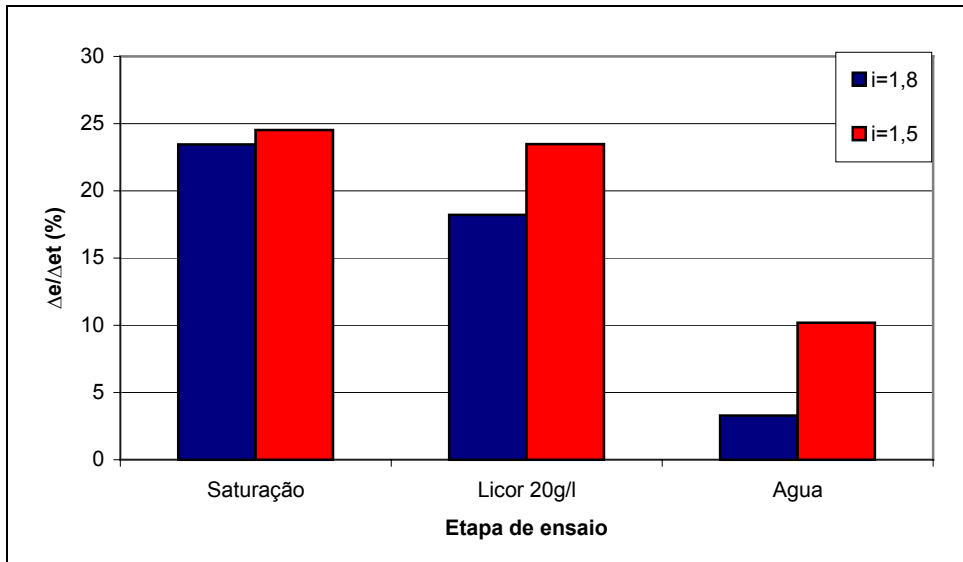


Figura 8.21 - % de variação de e – Ensaio Tipo 2

Como se observa na figura 8.21, o solo é susceptível a variar de volume quando, após de estabilizadas as deformações produzidas pela percolação do licor, sofre a percolação de água.

Para o coeficiente de permeabilidade, existe uma redução importante com a passagem de água. Na figura 8.22, são mostrados os valores finais do coeficiente de permeabilidade para cada etapa do ensaio. A maior redução se dá para o gradiente maior (1,8), esta redução pode dever-se ao deslocamento e acumulação de finos na parte inferior da amostra.

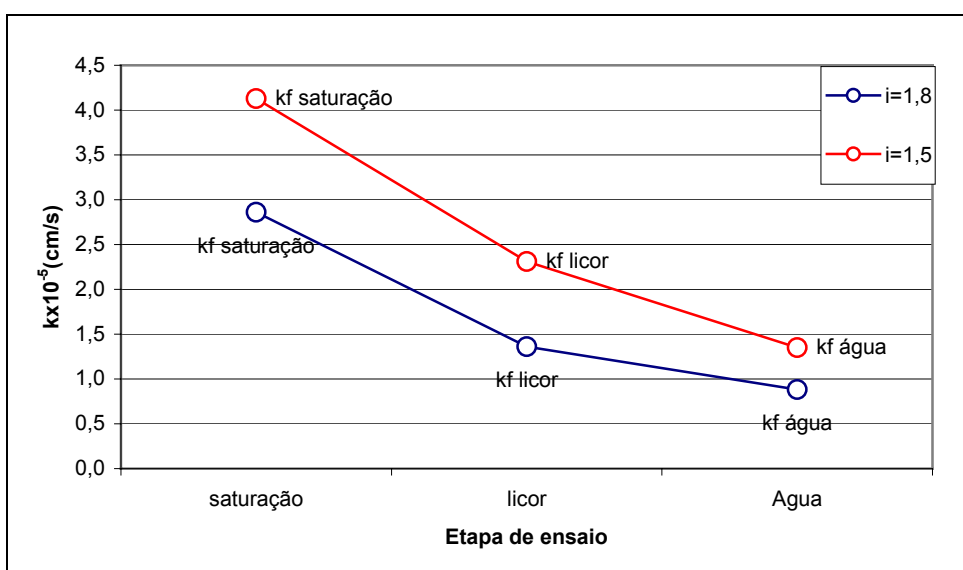


Figura 8.22 – Variação de k – Ensaio Tipo 2

- **Ensaio Tipo 3**

Neste ensaio, há uma redução do volume de vazios para os primeiros volumes de vazios percolados ($V_v \leq 1$) e um aumento no coeficiente de permeabilidade (k), salvo para a concentração 3 (10g/l), como já foi explicado no Capítulo 5. Isto foi apresentado nas figuras 5.12 a 5.17.

Analisando os valores finais atingidos pelos parâmetros, o que parece ser fundamental nesta interação entre o solo e o licor, é a concentração alcalina deste último.

As variações volumétricas dos corpos de provas são mínimas, como se observa na figura 8.23, para todas as concentrações. A situação muda com a análise do coeficiente de permeabilidade. O índice cresce com as concentrações de 20 e 70g/l. Dentre estes ensaios, para a concentração de 20 g/l, este crescimento é muito maior que para a concentração de 70g/l, como está mostrado na figura 8.24.

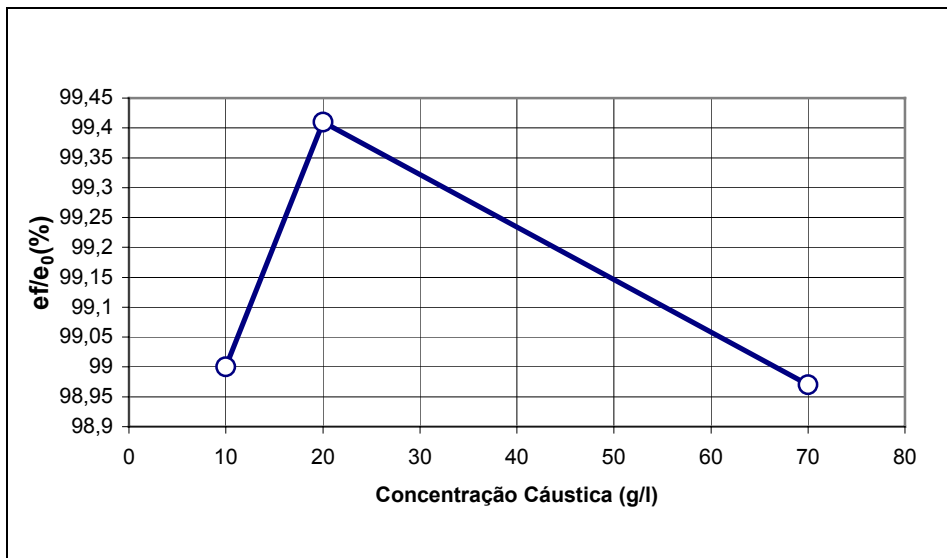


Figura 8.23 – Variação da relação ef/e_0

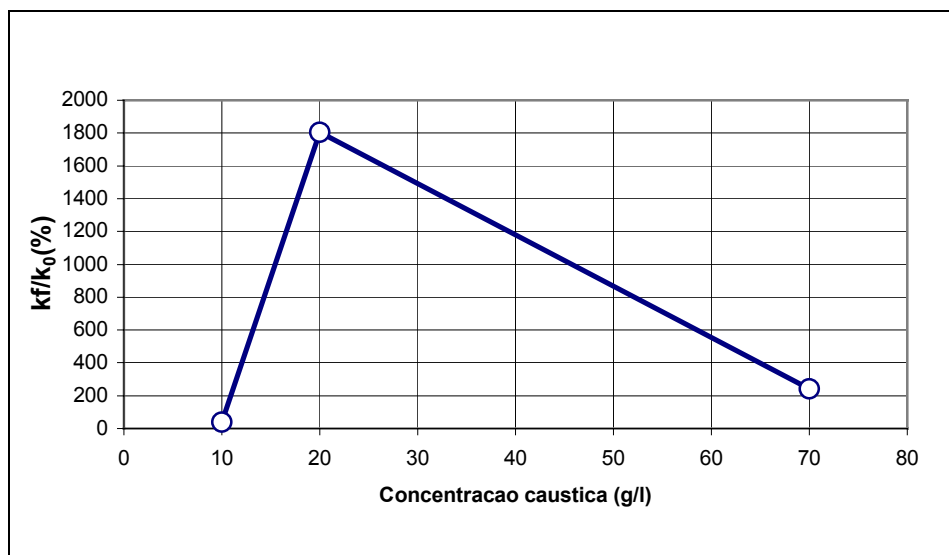


Figura 8.24 – Variação da relação k_f/k_0

8.4. Parâmetros de transporte

Os parâmetros de transporte determinados indicam, para os ensaios C_1 e C_3 , o predomínio do transporte advectivo, e no caso do ensaio C_2 , um predomínio do transporte por difusão. Para os ensaios C_1 e C_3 , se utilizaram concentrações cáusticas baixas, 20 e 10 g/l, respectivamente. No ensaio C_2 , se utilizou a maior concentração testada, de 70 g/l. Assim nos ensaios C_1 e C_3 , os gradientes de velocidade parecem dominar o fenômeno de transporte por sobre os gradientes de concentração. No ensaio C_3 , está situação muda, passando a dominar o transporte de solutos, o gradiente de concentração.

Também se observa dos valores do coeficiente de retardamento e de partição, que a interação entre o solo e o efluente, em termos de reações de retardamento, tipo adsorção-desorção, é baixa.

Este fenômeno era esperado já que o solo é basicamente uma areia fina quartzosa, com um baixo conteúdo de finos. Estes finos são cauliniticos, com baixa capacidade de troca catiônica, e baixa superfície específica, como se deduz dos valores de superfície específica e CTC informados para os materiais naturais, e dos ensaios mineralógicos. Yong (2001) observa que dois dos parâmetros do solo que dominam o processo de interação com os contaminantes são a superfície específica e a capacidade de troca catiônica. Um outro fator importante é a pouca quantidade de material sensível ao contaminante que o solo apresenta, composto só pela fração argila, que é menor que 15 %.

Acontecem, durante a passagem do licor, reações de precipitação, com a precipitação de hidróxidos de ferro e manganês e, presumivelmente, também de alumínio. A variação de pH, que acontece nas etapas iniciais de ensaio, permitiria a precipitação destes hidróxidos.

Os valores de retardamento são menores para o ensaio C₂, onde o transporte é predominantemente advectivo. Também aqui acontecem os menores valores de k_d , e também se observa uma variação do pH quase imediata à entrada do licor cáustico (Figura 6.22). Neste ensaio também, e pelo fato da concentração ser maior, se registra o maior valor de pH do efluente, de aproximadamente 13. Esta mudança rápida de pH pode ser a responsável pela rápida precipitação de hidróxidos, que é observada no decorrer do ensaio com a mudança na cor dos efluentes, e confirmada pela análise química dos mesmos.

Na figura 8.25 são apresentados os valores do fator de retardamento para cada concentração. Pode ser observado que os maiores valores de fator de retardamento correspondem com a concentração menor (10 g/l). Para os gradientes de 0,5 e 1,0, a variação do fator de retardamento para concentrações maiores que 20 g/l é mínima, o que poderia indicar que para concentrações causticas maiores que 20, temos um predomínio de transporte por gradiente de concentração.

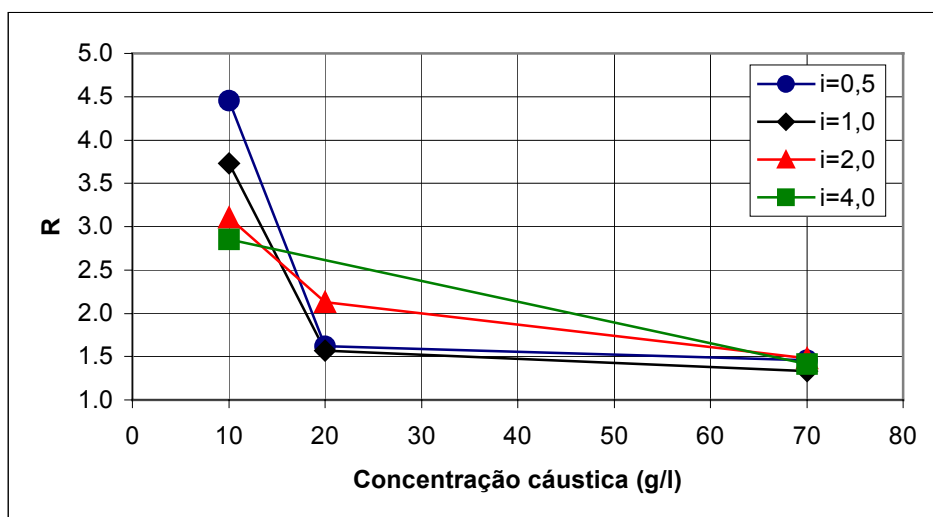


Figura 8.25 – Fator de Retardamento

A figura 8.26 apresenta a variação do coeficiente de dispersão hidrodinâmica, e confirma o comportamento mostrado pelo fator de retardamento.

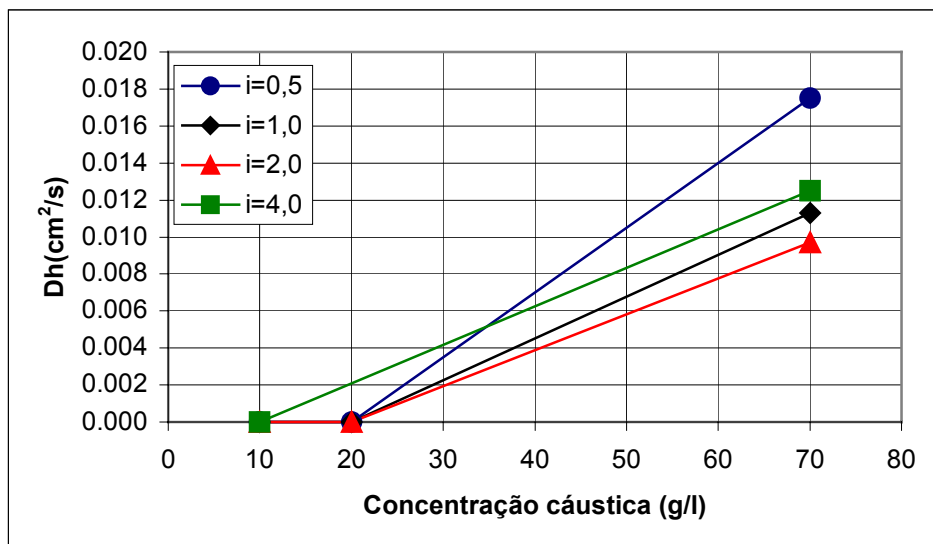


Figura 8.26 – Variação do coeficiente Dh.

8.5. Curvas características de Sucção

As curvas características de sucção mostram um crescimento no valor da sucção total após a passagem do licor. Isto era esperado, dado que aumenta o conteúdo de sais da água intersticial. Este aumento também está demonstrado pelo aumento da condutividade elétrica dos materiais, após a passagem do licor.

Na curva característica de sucção mátrica quase não há mudanças, pelo menos não em uma magnitude grande. Na porção da curva característica a níveis baixos de sucção ocorrem pequenas variações no valor de entrada de ar e no conteúdo de água residual. Na parte da curva característica correspondente a níveis mais elevados de sucção, há uma mudança nos valores de entrada secundária de ar. Para o ensaio C_1 e para C_2 cresce e, para o C_3 permanece praticamente igual. Apesar da diminuição de vazios ser de pouca magnitude, esta pequena mudança é importante para níveis de sucção elevados. Um outro fator que pode estar influenciando estes valores está relacionado com a forma em que as partículas finas estão agrupadas. Dos ensaios de granulometria (item 8.1.1) se observa que para a concentração C_1 (20g/l) o solo se comporta como floculado, salvo para o menor gradiente $i=0,5$ que é sobre a amostra que foram feitos os ensaios. Para a C_2 (70g/l) o comportamento é disperso, já para a concentração menor C_3 (10 g/l) o solo se apresenta disperso, mas este efeito é mínimo.

Nas figuras 8.25 e 8.26 são apresentadas, para cada concentração, a comparação entre as curvas características de sucção mátrica entre o solo sem contaminar e o solo contaminado. Nestas figuras, é possível observar que o valor de entrada de ar cresce com a concentração do licor.

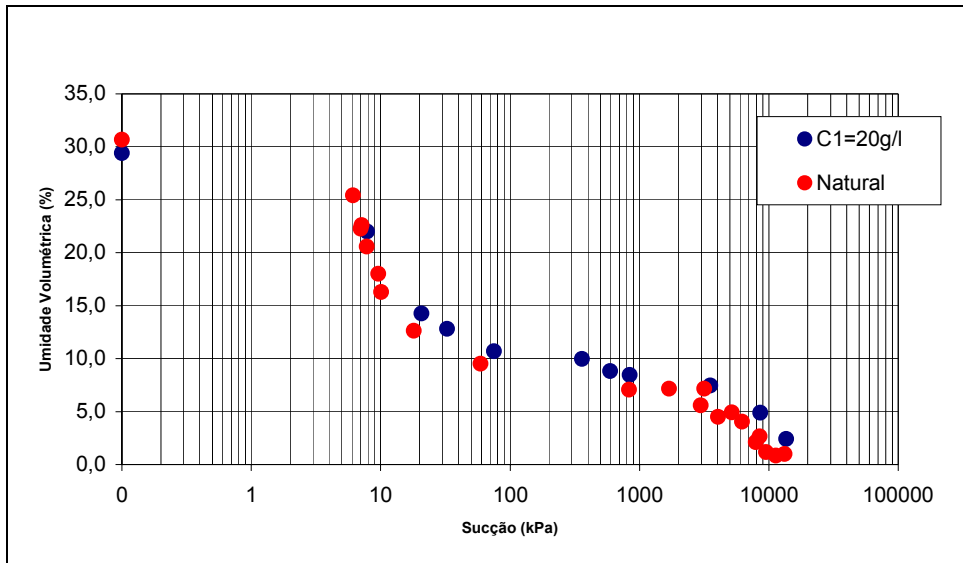


Figura 8.27 – Curva Característica de sucção mátrica – Ensaio C₁

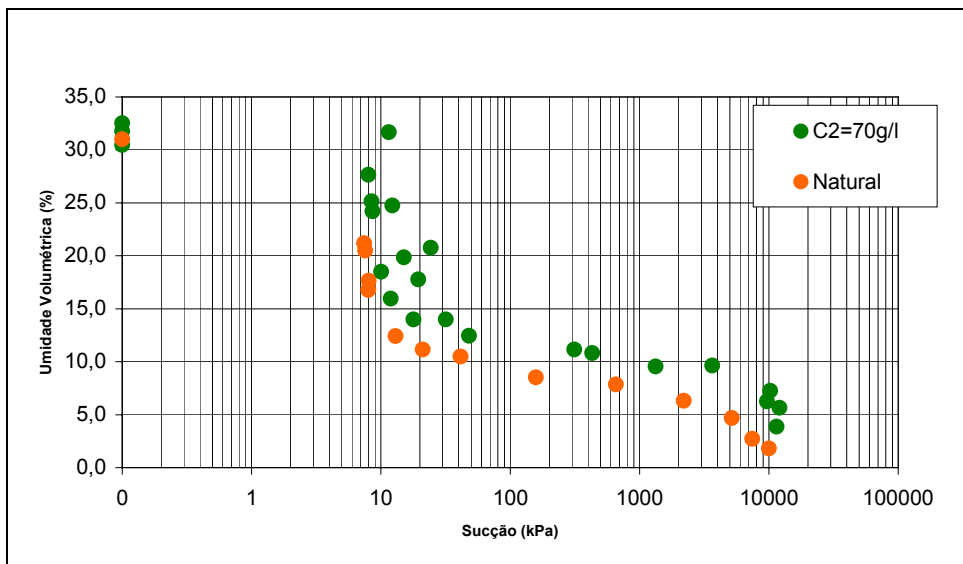


Figura 8.28 – Curva característica de sucção mátrica – Ensaio C₂

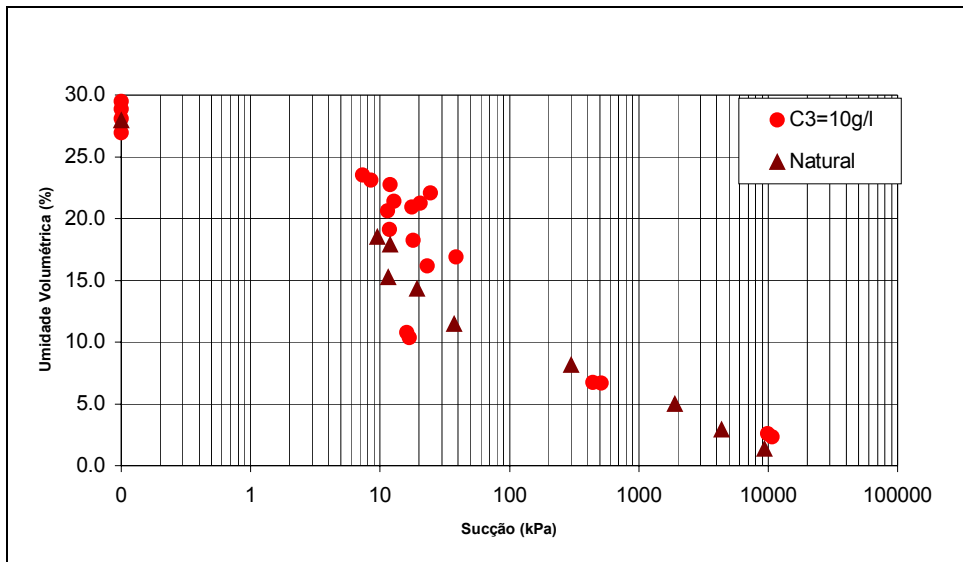


Figura 8.29 – Curva característica de sucção mátrica – Ensaio C₃

Mas, basicamente os valores de sucção que mudam com a presença do licor, são os valores de sucção total.

Estas mudanças podem ser observadas considerando as curvas características com todos os dados de ensaio, como está plotado na figura 8.30 para o material natural, e na figura 8.31 para o material contaminado.

Da figura 8.30, observa-se a quase coincidência dos valores de sucção para os distintos materiais utilizados, isto fato é muito interessante sob ponto de vista da aplicabilidade do método de papel filtro. Os materiais ensaiados provêm de blocos diferentes, e os ensaios foram feitos em tempos diferentes, mesmo assim a curva é a mesma para os três materiais.

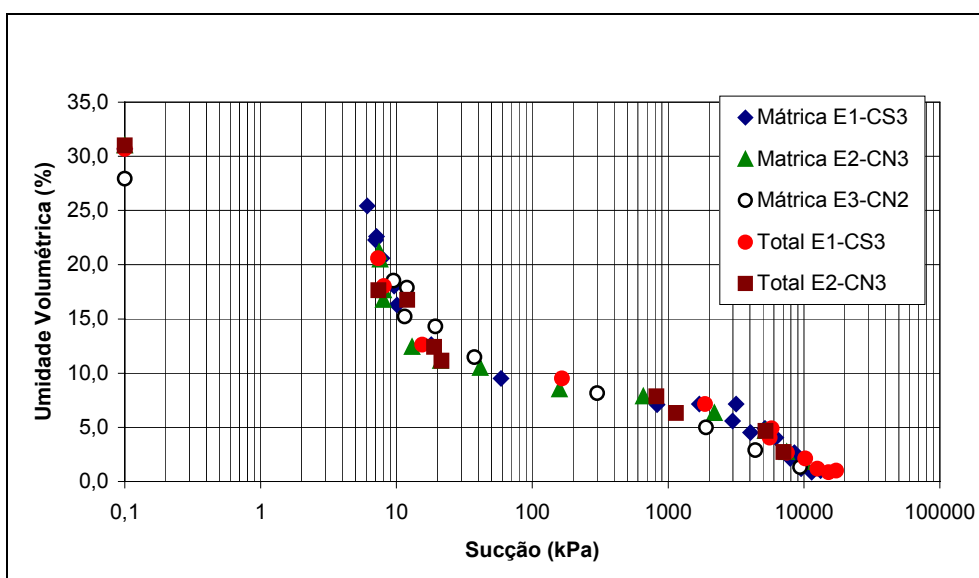


Figura 8.30 – Curvas características dos materiais naturais

Da figura 8.31, também se observa que os valores de sucção total crescem com o valor da concentração do licor cáustico. Os valores de sucção mátrica mostram quase o mesmo comportamento que no caso do material não contaminado.

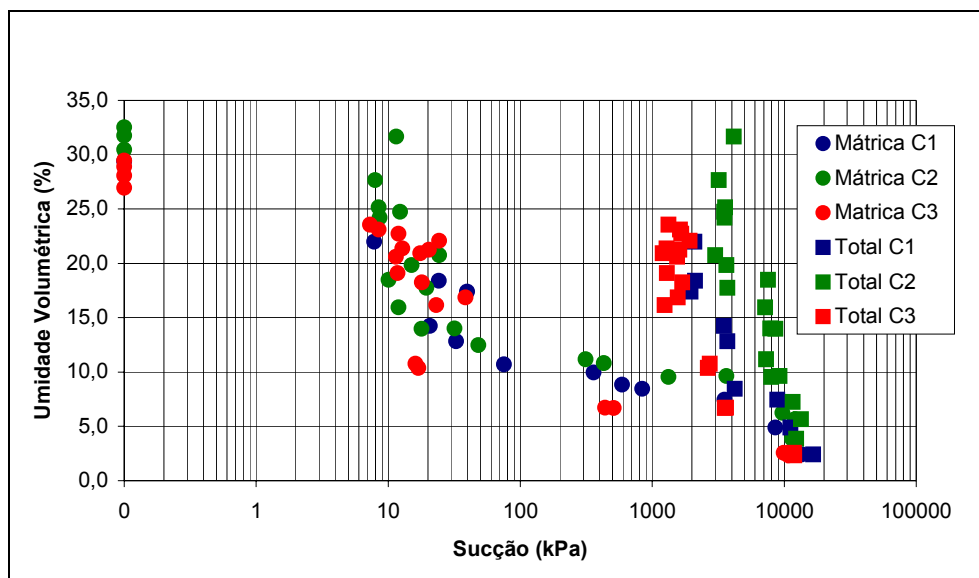


Figura 8.31 – Curvas Características de Sucção para os materiais contaminados.

Por último, os valores de sucção osmótica também crescem com a concentração do licor, e poderia dizer-se que apresentam um crescimento linear com a diminuição de umidade, ou seja existiria um aumento na concentração de sais. Este crescimento continua até um determinado conteúdo de umidade, onde a sucção osmótica começa a diminuir. Uma possível explicação para esta mudança no comportamento da sucção osmótica, poderia ser a precipitação dos sais a partir de um determinado conteúdo de umidade que parece ser função da concentração utilizada no ensaio. A quantidade de ensaios feitos não permite afirmar que esta seja a única razão, seria necessário fazer outros ensaios variando as concentrações para avaliar corretamente o comportamento da sucção osmótica.

8.6. Discussão dos resultados

As propriedades dispersivas do NaOH são conhecidas, tanto é assim que este material é utilizado como dispersante nos ensaios de sedimentação de

alguns materiais. Esta propriedade é consequência, segundo Seta & Karathanasis (1996), do efeito dispersivo combinado do Na e do pH da suspensão. A adição de Na a amostras de solos promove a expansão da camada dupla em torno das partículas de argila, de tal forma que as forças de repulsão geradas são fortes o suficiente para superar as forças de atração e manter as argilas dispersas (Ferreira et al.,2002). A dispersão é também favorecida pelo aumento do pH, o que gera cargas negativas, alterando o balanço de cargas, principalmente em solos cuja fração argila é rica em Fe, Al, caulinita ou matéria orgânica (Seta & Karathanasis, 1996).

Dependendo da concentração do NaOH, pode, entretanto, ocorrer floculação em vez de dispersão.

Hajra et al. (2002), estudando a diminuição da permeabilidade em filtros, avaliaram o comportamento de suspensões de caulinita com diferentes materiais, entre eles soluções de NaOH em concentrações de 0,001 M e 0,01 M. Acharam que a floculação das partículas de caulinita é maior com a concentração de 0,001M. Os flocos originados na presença de solução 0,01 M são de dimensões maiores que os originados com uma concentração de 0,001 M, mas estes últimos, por sua vez, são mais numerosos.

Estas propriedades dispersivas podem ser observadas também com o licor em estudo, mas o fenômeno é mais complexo, porque além da presença de NaOH, o licor tem também Fe e Al. Foram identificados, no efluente, a presença de Fe^{3+} e Mn^{2+} , e é muito provável, também, a presença de outros íons como o Al^{2+} . Estes íons multivalentes também promovem a floculação das argilas.

Em alguns dos ensaios executados, é visível a floculação das argilas, como no caso do ensaio com gradiente 1,0 (Tipo 1 – Ensaio 1). Neste ensaio, os valores de silte crescem e os da fração argila decrescem, como está mostrado na figura 8.1, mas a observação na lupa (figura 8.12) mostra a existência de grãos de quartzo unidos por uma cimentação avermelhada. Esta cimentação pode ser explicada pela precipitação de hidróxidos metálicos de ferro e alumínio. Os conteúdos de ambos metais crescem no solo após da passagem do licor (figuras 8.9 e 8.10). Esta formação de agregados maiores provoca uma reorganização da macro-estrutura do solo.

Nos outros ensaios edométricos Tipo 1, existe também um aumento do conteúdo de argila e uma diminuição da fração silte. Nestes casos, o licor parece comportar-se como um defloculante. Na observação na lupa não foi possível observar floculação da fração argila e, os grãos de quartzo aparecem limpos e separados.

A diminuição dos valores de coeficiente de permeabilidade no licor com relação aos valores iniciais com água, pode estar sendo provocada pelo deslocamento de partículas finas, reduzindo o tamanho dos poros, assim como também a precipitação de hidróxidos, provocando o mesmo fenômeno. A observação das lâminas petrográficas não permite ver esta mudança, mas uma contagem de poros talvez permitisse observar alguma diferença numérica entre o tamanho de vazios das amostras contaminadas e sem contaminar.

A existência de uma mudança no tamanho dos vazios entre as amostras contaminadas e as amostras naturais se percebe da mudança nas curvas características de sucção mátrica para a porção correspondente com as sucções mais elevadas. Isto pode observar-se nas figuras 8.27 a 8.29, e é ampliado na figura 8.32 mostrando a parte inferior da curva característica do Ensaio C₂. Nestas figuras se observa que a medida que cresce a concentração do licor, cresce o valor de entrada secundária de ar, o que poderia estar indicando uma redução de tamanho dos poros menores.

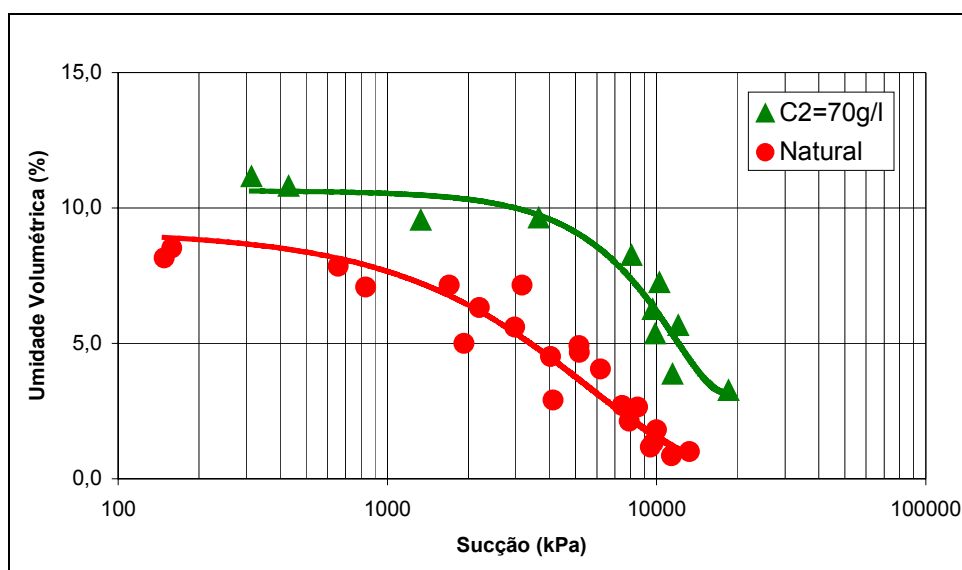


Figura 8.32 – Ampliação da curva característica – Ensaio C₂.

O ensaio Tipo 2, onde tem-se três etapas de percolação (água-licor-água), permite concluir que a colapsividade do solo é aumentada com a percolação de água após estabilizadas as deformações provocadas pelo licor. Na concentração utilizada nestes ensaios, o licor cáustico parece comportar-se como floculante. Então, tem-se as partículas de argila agrupadas e separadas, e a passagem de água as carrega e as desloca para a parte inferior da amostra, provocando uma diminuição do tamanho dos poros. A existência de um deslocamento de material

é uma evidência observada diretamente na execução do ensaio e quantificada indiretamente no Capítulo 5.

No caso do Ensaio Tipo 3, as evidências de floculação da fração argila são mais aparentes: há um aumento das frações silte e, diminuição da fração argila, nas concentrações maiores (20 e 70 g/l) como está mostrado na figura 8.4, o que é coerente com o observado na lupa (figuras 8.13 e 8.14), onde pode ver-se a floculação das partículas finas. No caso da concentração menor (10 g/l), não se notou evidências de floculação.

Esta floculação das partículas finas parece explicar a variação no coeficiente de permeabilidade das amostras (Figura 8.24), que cresce nas concentrações de 20 e 70, sendo ainda mais forte este crescimento para a concentração de 20 g/l. Também aqui há evidência visual da precipitação de hidróxidos, e a coloração das partículas floculadas leva a pensar que os materiais cimentantes são hidróxidos de ferro e alumínio.

Apesar de não ter sido observado evidência de floculação no ensaio com concentração de 10 g/l, pode ter acontecido um fenômeno similar ao citado por Hajra (2002), ou seja, a formação de flocos menores, que não foram retidos na peneira # 400. A confecção de lâminas com os materiais provenientes deste ensaio talvez permitissem observar este fenômeno e explicar o maior crescimento do coeficiente k para a concentração cáustica de 20g/l.

A redução de permeabilidade que se observa nos ensaios Tipo 1 (seqüência de percolação: água-licor cáustico) e Tipo 2 (seqüência de percolação: água-licor cáustico-água) pode dever-se a uma combinação dos fenômenos de floculação e deslocamento de finos. A floculação dos finos produz um rearranjo da estrutura do solo, deixando-a mais aberta, mas também estes flocos podem ser carregados pelo licor ou pela água e bloquear poros maiores. Um dos inconvenientes para observar se há ocorrência ou não deste fenômeno nas amostras das lâminas petrográficas é a grande quantidade de grãos de quartzo. Só uma contagem de poros permitiria obter alguma diferença mais evidente.

A existência de precipitação de hidróxidos resulta evidente da mudança dos conteúdos de ferro e alumínio, da situação natural para a situação contaminada, que é concomitante com a diminuição dos valores destes elementos nos licores efluentes, e é coerente com a variação de pH do sistema solo-licor durante a execução do ensaio. Sem dúvida, a complexidade da interação entre o licor cáustico e o solo é tanta, que não é possível, a partir dos ensaios feitos, concluir que seja só este o fenômeno acontecido.