

5 Ensaio de Adensamento e Colapsividade

5.1. Introdução

Segundo Aitchison (1973) o colapso e o inchamento podem ser considerados processos de instabilidade estrutural, devido a que induzem descontinuidades no comportamento deformacional do solo ao variar as condições ambientais sem modificação do estado de tensões externas.

A característica colapsível está intrinsecamente relacionada com a estrutura do solo. Daí a importância do conhecimento não só desta estrutura, mas também da interação físico-química entre o fluido infiltrante e o solo a nível de contato entre os grãos (Mitchell, 1976).

Existem diversos critérios para avaliar a tendência ao colapso dos solos, alguns deles baseados na correlação entre propriedades do solo simples de medir, como a distribuição granulométrica e os limites de consistência, e o potencial de colapso. Porém, estes critérios, devido à variedade existente de solos e de líquidos contaminantes, muitas vezes estão restritos às situações similares às estudadas pelo pesquisador que obteve o método. Exemplos destes métodos de correlação podem ser encontrados em Costa Junior (2001).

Neste trabalho, optou-se pela execução de ensaios edométricos, que permitem a possibilidade de simular as condições de campo, isto é infiltração vertical e aplicação de carregamentos que simulam as condições de tensões no campo, obtendo-se diretamente a variação de volume das amostras em relação ao tempo e ao volume percolado.

Os ensaios realizados podem ser divididos em três tipos:

- a. Ensaio Tipo 1 – no edômetro ADS, com amostras de 7 cm de diâmetro e 9,85 cm de altura, submetidas à percolação com água até a saturação, no nível nominal de tensões efetivas de 200 kPa, e subsequentemente, submetidas à percolação de licor em diferentes concentrações (C_1 , C_2 e C_3). Corresponderam a este tipo, os ensaios C_1 , C_2 e C_3 .

- b. Ensaio Tipo 2 – condições idênticas ao Tipo 1, com a variante que logo após a percolação do licor, percolou-se água. Executados com as amostras de gradiente hidráulico 1,8 e 1,5 do Ensaio C₁.
- c. Ensaio Tipo 3 – nas células edométricas modificadas, com amostras de 7 cm de diâmetro e 2 de altura, preparadas com material passante na peneira #200, compactado estaticamente, submetidas à percolação com água até a saturação, seguida de percolação de licor nas concentrações C₁, C₂ e C₃.

5.2. Ensaio Executados

5.2.1. Ensaio Tipo 1

Correspondem a este grupo, os ensaios denominados C₁, C₂ e C₃. Cada um destes ensaios corresponde, em realidade, a uma série de 4 ensaios individuais, cuja diferença está no gradiente hidráulico utilizado na execução dos mesmos. Na tabela 5.1 se resumem estas características,

Tabela 5.1 – Características dos ensaios edométricos Tipo 1

Ensaio	Solo	Concentração Licor	Gradientes Hidráulicos
C ₁	E1 – CS3	20 g/l	1,8 – 1,5 – 1,0 – 0,5
C ₂	E2 – CN3	10 g/l	4,0 – 2,0 – 1,0 – 0,5
C ₃	E3 – CN2	70 g/l	4,0 – 2,0 – 1,0 – 0,5

Os ensaios foram executados no Edômetro ADS, sobre amostras não amolgadas provenientes dos blocos indeformados, e carregadas com uma tensão vertical efetiva de 200 kPa. Este valor de tensão efetiva foi adotado por ser o mesmo aproximadamente correspondente à superposição dos valores decorrentes da distribuição de tensões efetivas verticais geostáticas e dos bulbos de tensões decorrentes do peso das estruturas existentes no local afetado pela infiltração do licor cáustico (Costa Filho, 2003 – comunicação pessoal).

A escolha de diferentes gradientes hidráulicos para a realização dos ensaios teve por finalidade observar dois fenômenos: a possível mudança no comportamento compressível de acordo com o gradiente hidráulico, e a obtenção dos parâmetros de transporte do contaminante. O primeiro destes aspectos será descrito neste capítulo, e o segundo, analisa-se no Capítulo 6.

Como já foi citado no Capítulo 3, a primeira etapa do ensaio consiste na saturação do corpo de provas com água destilada, e a segunda, na percolação do licor na concentração escolhida. O ensaio era finalizado quando se obtinha uma concentração do efluente igual à concentração da solução no Mariotte ou quando a mudança na leitura do deslocamento vertical era mínima. Esta etapa de percolação do licor demorou de 14 a 75 dias para ser completada, dependendo da concentração do licor e da umidade inicial da amostra.

Na etapa de percolação com licor cáustico, foram coletadas amostras de efluente a volumes regulares, em geral cada um volume de vazios. Mas o comportamento de algumas amostras obrigou a realizar esta coleta a intervalos menores ou maiores.

Um fato interessante destes ensaios foi que durante a percolação do licor, em particular nos primeiros dias de ensaios, observou-se a ocorrência de perda de finos nas amostras. Esta perda foi quantificada, indiretamente, e aparece nas tabelas 5.2, 5.3 e 5.4. A figura 5.1 mostra uma evidência desta observação.



Figura 5.1 – Vista da base da célula edométrica, mostrando a perda de finos.

Tabela 5.2 - Cálculo da perda de finos – Ensaio C₁

Gradiente Hidráulico (*)	Peso Seco Inicial (g)	Peso Seco Final (g)	Perda de finos (g)	% do Peso Seco Inicial (g)
i = 1,8	619,61	630,15	-10,54	1,70
i = 1,5	669,26	675,95	-6,69	0,99
i = 1,0	559,04	565,85	-6,85	1,23
i = 0,5	674,45	675,14	-0,69	0,10

(*) gradiente hidráulico utilizado no ensaio edométrico.

Tabela 5.3 - Cálculo da perda de finos – Ensaio C₂

Gradiente Hidráulico (*)	Peso Seco Inicial (g)	Peso Seco Final (g)	Perda de finos (g)	% do Peso Seco Inicial (g)
i = 4,0	667,22	669,95	-2,73	0,41
i = 2,0	682,96	689,49	-6,53	0,96
i = 1,0	676,21	685,56	-9,35	1,38
i = 0,5	714,97	721,79	-6,82	0,95

(*) gradiente hidráulico utilizado no ensaio edométrico.

Tabela 5.4 - Cálculo da perda de finos – Ensaio C₃

Gradiente Hidráulico (*)	Peso Seco Inicial (g)	Peso Seco Final (g)	Perda de finos (g)	% do Peso Seco Inicial (g)
i = 4,0	701,46	694,68	6,78	0,97
i = 2,0	689,89	689,06	0,83	0,12
i = 1,0	693,67	695,37	-1,70	0,25
i = 0,5	697,52	692,25	5,27	0,76

(*) gradiente hidráulico utilizado no ensaio edométrico.

Dos valores apresentados nas tabelas, se observa que em alguns casos existiu perda, e em outros, ganho de material. Da observação dos efluentes em todas as amostras, se percebeu perda de material fino, de coloração vermelha. O ganho em massa de sólidos pode ser explicado pela precipitação de carbonatos existentes no licor durante sua passagem pelo solo, e também pela formação e precipitação de hidróxidos metálicos (ferro e alumínio). Esta segunda hipótese é bastante provável devido à existência destes metais no licor, e que o fenômeno é factível de acontecer ao colocar em contato um solo ácido com um licor altamente alcalino. Por outro lado, a precipitação de hidróxidos também foi verificada pela observação das lâminas petrográficas (ver Capítulo 8). Uma outra

causa provável é a precipitação de carbonatos existentes na água dos poros pela mudança de pH do meio, ou uma combinação dos três fenômenos. De qualquer maneira, seja qual for o fenômeno que provoca este crescimento no peso, esta variação é menor que dois por cento do peso inicial da amostra, razão pela qual no foi tomada em conta nos cálculos dos índices físicos das amostras.

As características iniciais e finais dos corpos de prova são apresentadas nas tabelas 5.5, 5.6 e 5.7.

Tabela 5.5 – Resumo dos índices físicos – Ensaio C₁

	i = 1,8		i = 1,5		i = 1,0		i = 0,5	
	inicial	final	inicial	final	inicial	final	inicial	final
w = umidade (%)	13,21	13,83	13,23	14,31	11,79	14,80	11,73	13,74
D = diâmetro (cm)	7,00	7,00	7,00	7,00	7,00	7,00	7,00	7,00
H = altura (cm)	9,85	8,55	9,85	9,20	9,85	9,00	9,85	9,30
Vt = Volume total (cm ³)	379,07	329,04	379,07	354,06	379,07	346,17	379,07	357,91
Vs = Volume de sólidos (cm ³)	231,45	231,42	249,99	249,99	208,82	208,82	251,93	251,93
Vv = Volume de vazios (cm ³)	147,63	92,35	129,08	104,07	170,25	137,61	127,15	106,31
Vw = Volume de água (cm ³)	81,82	83,67	88,37	95,77	65,88	82,73	79,09	92,66
Va = Volume de ar (cm ³)	65,81	8,68	40,71	8,30	104,36	54,87	48,05	13,65
e = índice de vazios	0,638	0,431	0,516	0,428	0,815	0,659	0,505	0,422
n = porosidade	0,389	0,301	0,341	0,300	0,449	0,397	0,335	0,297
S = grau de saturação (%)	55,42	90,60	68,46	92,01	38,70	60,12	62,21	87,16

Tabela 5.6 - Resumo dos índices físicos – Ensaio C₂

	i = 4,0		i = 2,0		i = 1,0		i = 0,5	
	inicial	final	inicial	final	inicial	final	inicial	final
w = umidade (%)	0,28	18,44	0,26	16,91	0,26	18,61	0,34	13,40
D = diâmetro (cm)	7,00	7,00	7,00	7,00	7,00	7,00	7,00	7,00
H = altura (cm)	9,85	9,49	9,85	9,58	9,85	9,70	9,85	9,65
Vt = Volume total (cm ³)	379,07	365,22	379,07	368,68	379,07	373,30	379,07	371,38
Vs = Volume de sólidos (cm ³)	249,89	249,89	255,92	255,92	253,26	253,26	267,78	267,78
Vv = Volume de vazios (cm ³)	129,18	107,95	123,16	112,76	125,81	120,04	111,29	103,60
Vw = Volume de água (cm ³)	1,89	116,12	1,807	109,59	1,79	120,06	2,43	90,93
Va = Volume de ar (cm ³)	127,29	0,00	121,35	3,17	124,02	0,00	108,86	12,67
e = índice de vazios	0,517	0,432	0,481	0,412	0,497	0,455	0,416	0,387
n = porosidade	0,341	0,302	0,325	0,292	0,332	0,313	0,294	0,279
S = grau de saturação (%)	1,46	107,57	1,47	97,19	1,42	100,02	2,18	87,77

Tabela 5.7 - -- Resumo dos índices físicos – Ensaio C₃

	i = 4,0		i = 2,0		i = 1,0		i = 0,5	
	inicial	final	inicial	final	inicial	final	inicial	final
w = umidade (%)	1,16	15,26	1,45	17,02	3,55	16,97	1,56	16,19
D = diâmetro (cm)	7,00	7,00	7,00	7,00	7,00	7,00	7,00	7,00
H = altura (cm)	9,85	9,60	9,85	9,70	9,85	9,65	9,85	9,52
Vt = Volume total (cm ³)	379,07	369,45	379,07	373,30	379,07	371,38	379,07	366,18
Vs = Volume de sólidos (cm ³)	262,72	262,72	258,39	258,39	259,80	257,23	261,24	258,67
Vv = Volume de vazios (cm ³)	116,35	106,73	120,68	114,91	119,27	114,14	117,83	107,51
Vw = Volume de água (cm ³)	8,14	105,98	10,00	116,24	24,63	116,55	10,88	111,82
Va = Volume de ar (cm ³)	108,22	0,75	110,68	0,00	94,644	0,00	106,95	0,00
e = índice de vazios	0,443	0,406	0,467	0,445	0,459	0,444	0,451	0,416
n = porosidade	0,307	0,289	0,318	0,308	0,315	0,307	0,311	0,294
S = grau de saturação (%)	6,99	99,29	8,29	101,16	20,65	102,11	9,24	104,01

• **Varição do índice de vazios e do coeficiente de permeabilidade**

A medição das variações de altura e, conseqüentemente, das variações de volume (já que amostra está impedida de deformar-se lateralmente), permitiu, calcular a variação do índice de vazios (e) e, utilizando a *lei de Darcy*, a variação do coeficiente de permeabilidade (k) com o volume de licor percolado. Os resultados destas análises são apresentados nas tabelas 5.8 a 5.16 e nas figuras 5.2 a 5.7.

Nas tabelas as denominações inicial e final, identificam os parâmetros ao início e fim de cada etapa.

Nestas figuras está representada a relação normalizada k/k_0 e e/e_0 . Onde o sub-índice 0 indica os valores dos índices para a amostra saturada com água e; k e e, os valores dos índices durante a etapa de percolação do licor.,

Tabela 5.8 - Resumo dos valores de e e Δe , para a fase de *saturação* com água e carregamento - Ensaio C₁.

Gradiente Hidráulico	e			Δe
	inicial	final	final/inicial (%)	
1,80	0,638	0,470	73,66	0,168
1,50	0,516	0,451	87,40	0,065
1,00	0,815	0,700	85,89	0,115
0,50	0,505	0,459	90,89	0,046

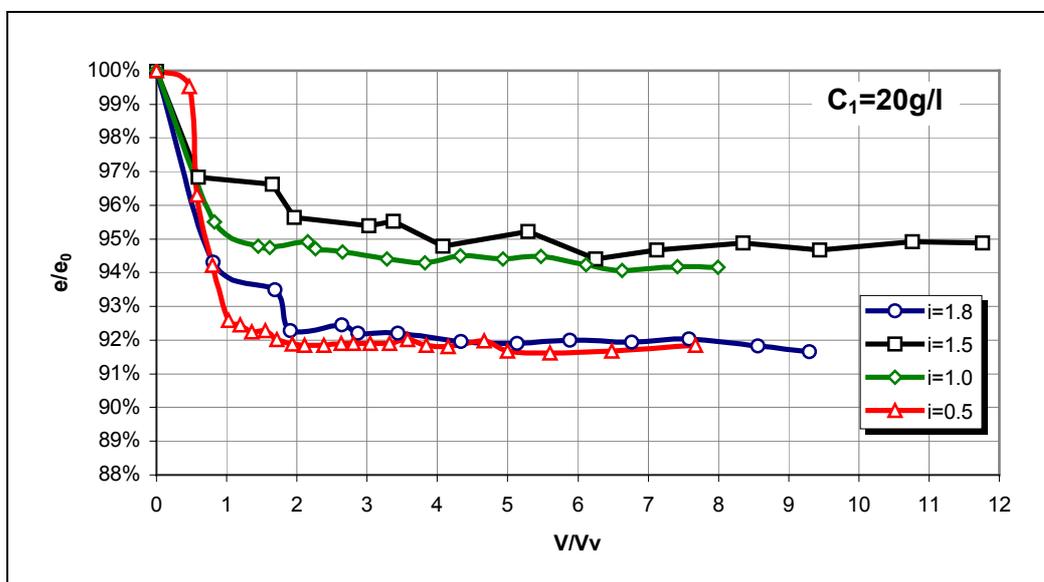
Tabela 5.9 – Resumo da variação de e , Δe e k , para a fase de percolação do licor – Ensaio C_1 .

Gradiente Hidráulico	e			Δe	k (cm/s)		
	inicial	final	final/inicial (%)		inicial	final	final/inicial (%)
1,80	0,470	0,431	91,70	0,039	$2,86 \times 10^{-5}$	$1,36 \times 10^{-5}$	47,55
1,50	0,451	0,428	94,90	0,023	$4,13 \times 10^{-5}$	$2,31 \times 10^{-5}$	55,93
1,00	0,700	0,659	94,14	0,041	$9,55 \times 10^{-5}$	$2,14 \times 10^{-5}$	22,41
0,50	0,459	0,422	91,94	0,037	$9,34 \times 10^{-5}$	$1,84 \times 10^{-5}$	19,70

Tabela 5.10 - Resumo da variação de Δe , nas diferentes etapas do ensaio – Ensaio C_1 .

Gradiente Hidráulico	Δe_t	$\Delta e_{a+s}/\Delta e_t$ (%)	$\Delta e_L/\Delta e_t$ (%)
1,80	0,207	81,16	18,84
1,50	0,088	73,86	26,14
1,00	0,156	73,72	26,28
0,50	0,083	55,42	44,58

Δe_t = variação total de e , Δe_{a+s} = variação de e devido à sobrecarga e à percolação da água, Δe_L = variação de e pela percolação do licor

Figura 5.2 – Variação do índice de vazios – Ensaio C_1

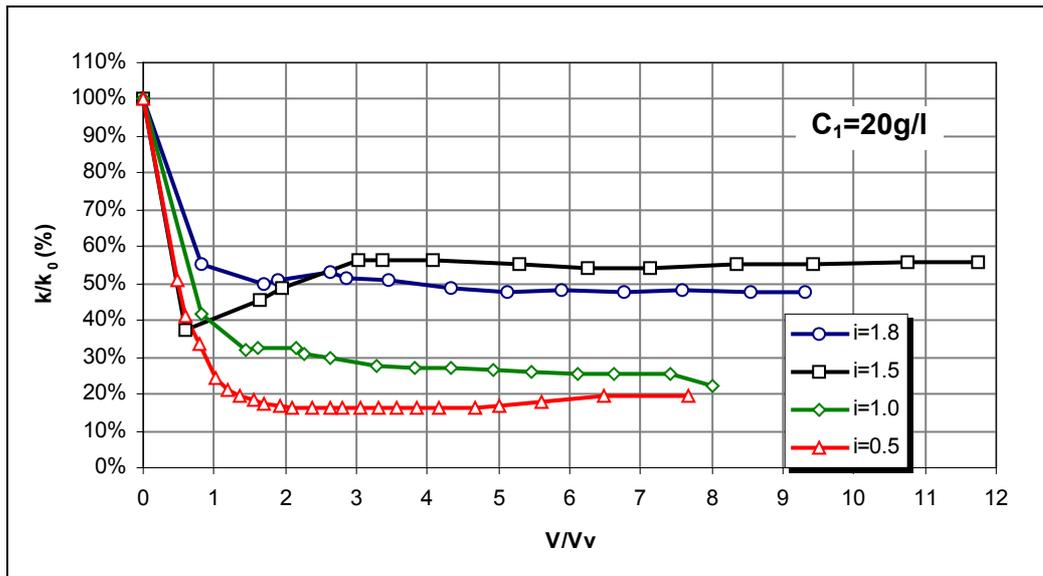


Figura 5.3 – Variação da condutividade hidráulica – Ensaio C₁

Tabela 5.11 - Resumo dos valores de e, para a fase de *saturação* com água e carregamento - Ensaio C₂

Gradiente Hidráulico	e			Δe
	inicial	final	final/inicial (%)	
4,00	0,486	0,457	94,03	0,029
2,00	0,452	0,423	93,58	0,029
1,00	0,477	0,458	96,02	0,019
0,50	0,416	0,402	96,63	0,014

Tabela 5.12 - Resumo da variação de e, e k, para a fase de percolação do licor– Ensaio C₂

Gradiente Hidráulico (i)	e			Δe	k (cm/s)		
	inicial	final	inicial/final (%)		inicial	final	inicial/final (%)
4,00	0,457	0,432	94,53	0,025	$3,10 \times 10^{-4}$	$8,87 \times 10^{-5}$	28,61
2,00	0,423	0,412	97,40	0,011	$7,21 \times 10^{-4}$	$1,28 \times 10^{-4}$	17,75
1,00	0,458	0,455	99,34	0,003	$4,63 \times 10^{-4}$	$3,45 \times 10^{-4}$	74,51
0,50	0,402	0,387	96,27	0,015	$3,10 \times 10^{-4}$	$5,61 \times 10^{-5}$	18,09

Tabela 5.13 - Resumo da variação de Δe , nas diferentes etapas do ensaio – Ensaio C_2

Gradiente Hidráulico	Δe_t	$\Delta e_{a+s}/\Delta e_t(\%)$	$\Delta e_L/\Delta e_t(\%)$
1,80	0,054	53,70	46,30
1,50	0,040	72,50	27,50
1,00	0,022	86,36	13,64
0,50	0,029	48,28	51,72

Δe_t = variação total de e, Δe_{a+s} = variação de e devido à sobrecarga e à percolação da água, Δe_L = variação de e pela percolação do licor

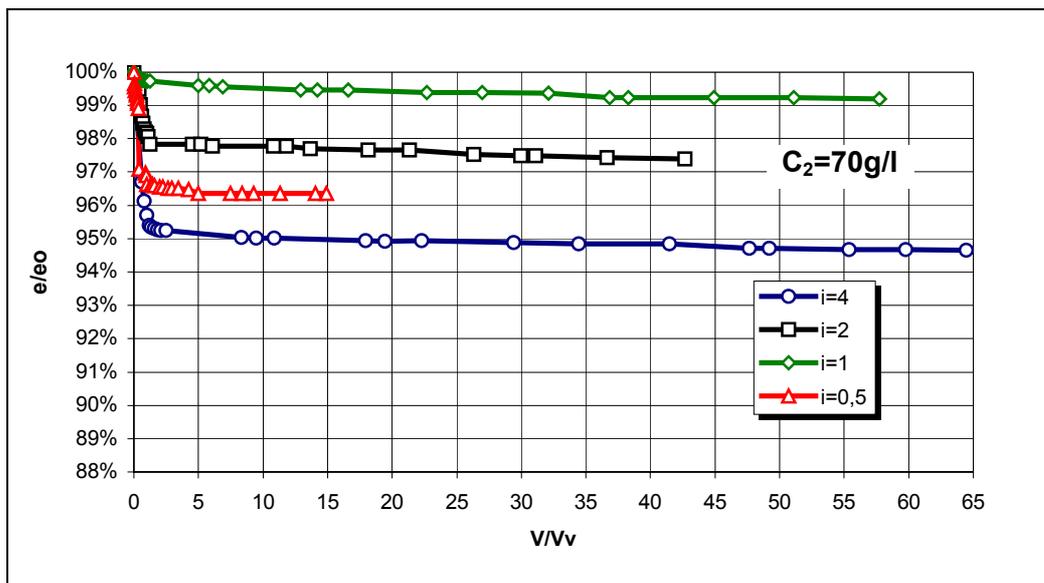
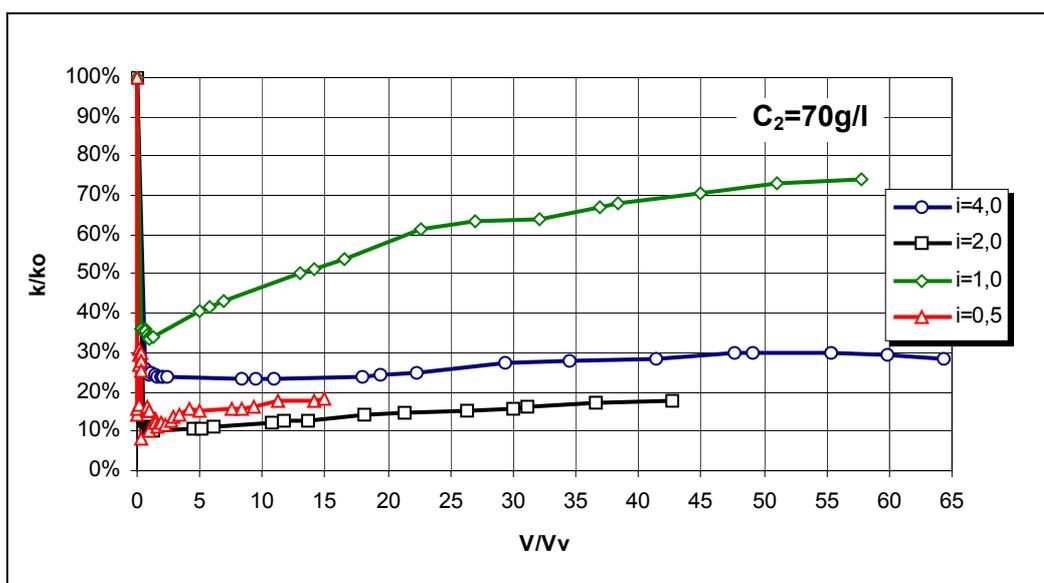
Figura 5.4 - Variação do índice de vazios – Ensaio C_2 Figura 5.5 - Variação da condutividade hidráulica – Ensaio C_2

Tabela 5.14 - Resumo dos valores de e, para a fase de saturação com água - Ensaio C₃

Gradiente Hidráulico	e			Δe
	inicial	final	final/inicial(%)	
4,00	0,443	0,423	94,03	0,020
2,00	0,467	0,452	93,58	0,015
1,00	0,459	0,445	96,02	0,014
0,50	0,451	0,411	96,63	0,040

Tabela 5.15 - Resumo da variação de e, e k, para a fase de percolação do licor– Ensaio C₃

Gradiente Hidráulico	e			Δe	k (cm/s)		
	inicial	final	final/inicial (%)		inicial	final	final/inicial (%)
4,00	0,423	0,387	91,49	0,036	$5,93 \times 10^{-5}$	$2,42 \times 10^{-5}$	40,81
2,00	0,452	0,429	94,91	0,023	$1,02 \times 10^{-4}$	$3,41 \times 10^{-5}$	33,43
1,00	0,445	0,416	93,48	0,029	$2,23 \times 10^{-4}$	$1,27 \times 10^{-4}$	56,95
0,50	0,411	0,363	88,32	0,048	$3,05 \times 10^{-4}$	$7,66 \times 10^{-5}$	25,11

Tabela 5.16– Resumo da variação de Δe , nas diferentes etapas do ensaio – Ensaio C₃

Gradiente Hidráulico	Δe_t	$\Delta e_{a+s}/\Delta e_t$ (%)	$\Delta e_L/\Delta e_t$ (%)
4,00	0,056	35,71	64,29
2,00	0,038	39,47	60,53
1,00	0,043	32,56	67,44
0,50	0,088	45,45	54,55

Δe_t = variação total de e, Δe_{a+s} = variação de e devido à sobrecarga e à percolação da água, Δe_L = variação de e pela percolação do licor

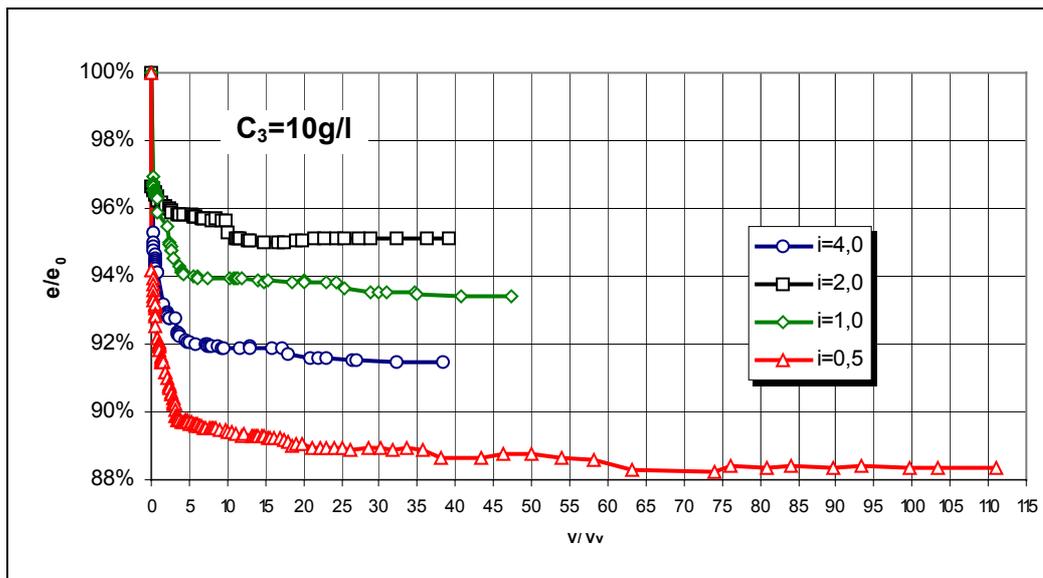


Figura 5.6 - Variação do índice de vazios – Ensaio C₃

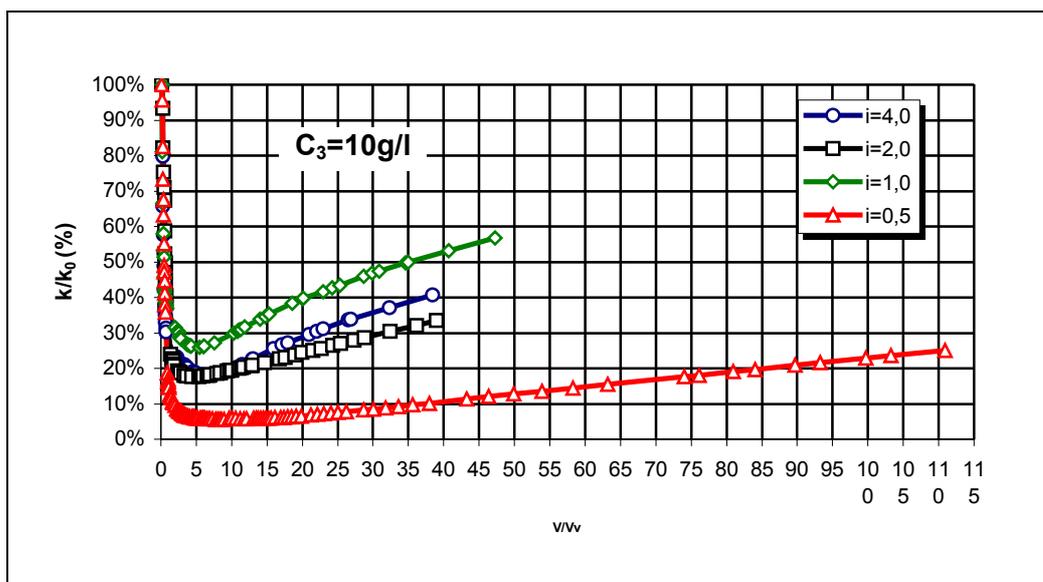


Figura 5.7 – Variação da condutividade hidráulica – Ensaio C₃

As tabelas 5.10, 5.13, 5.16 mostram a porcentagem de variação de volume correspondente a cada etapa do ensaio. O símbolo Δe_{a+s} se refere às variações de volume devidas à aplicação da sobrecarga e à percolação de água na fase de *saturação*. Desta variação, cerca de oitenta por cento corresponde ao efeito de aplicação da tensão vertical de 200 kPa, o que indica ter sido relativamente pequeno o efeito da percolação de água (*saturação*) nas características de compressão do material (Capítulo 8).

Uma outra análise possível é observar a variação do índice de vazios e do coeficiente de permeabilidade com o gradiente hidráulico. Estas variações estão mostradas nas figuras 5.8 e 5.9.

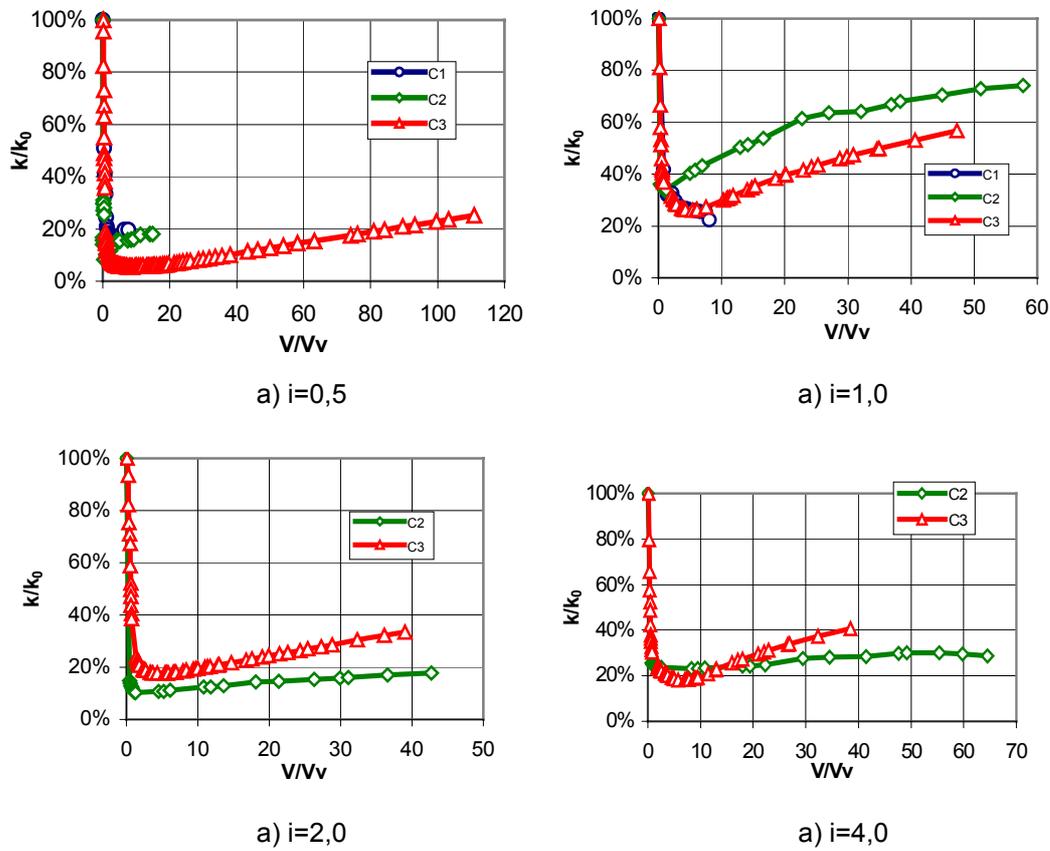
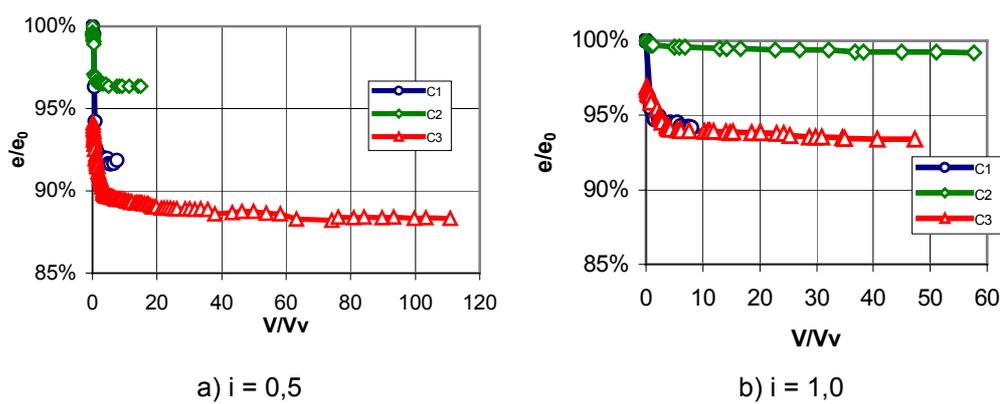


Figura 5.8 – Variação do coeficiente de permeabilidade com o gradiente hidráulico.



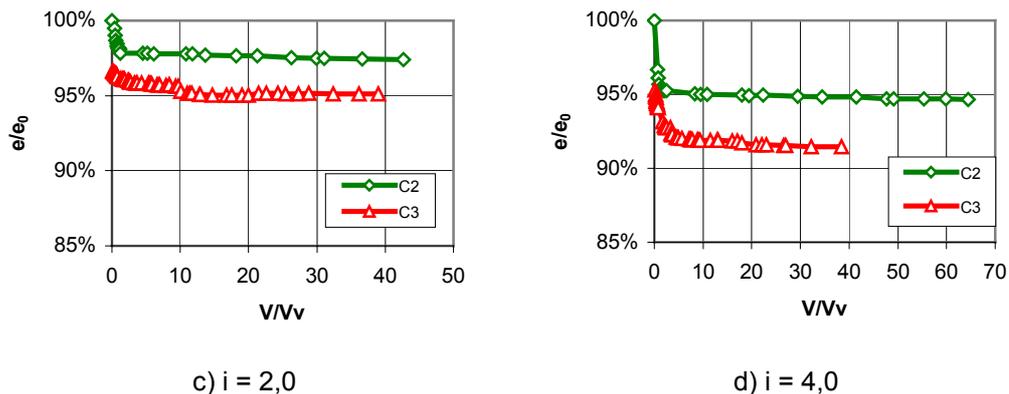


Figura 5.9 – Variação do índice de vazios com o gradiente hidráulico

5.2.2. Ensaio Tipo 2

Estes ensaios foram realizados sobre as amostras com gradiente hidráulico 1,8 e 1,5 do ensaio C1 (Tipo 1). Obtida a condição de concentração do efluente de 100%, trocou-se o licor por água destilada e começou-se a percolação de água. Esta etapa continuou até que não serem detectados traços do licor no efluente.

Da mesma maneira que nas etapas anteriores de ensaio (*saturação* com água e percolação com licor), monitorou-se o volume percolado e a variação de altura da amostra, e se coletou amostras do efluente para monitorar a variação da concentração.

Também nesta ocasião, observou-se a lavagem de material fino através do efluente. A quantidade de material perdida nesta etapa está incluída no valor de variação de massa de solo calculado na tabela 5.2.

Na tabela 5.17, se informam os valores dos índices físicos iniciais e finais das amostras.

Tabela 5.17 – Resumo dos índices físicos – Ensaio Tipo 2

	i = 1,8		i = 1,5	
	inicial	final	inicial	final
w = umidade (%)	13,21	13,83	13,23	14,31
e = índice de vazios	0,638	0,424	0,516	0,418
n = porosidade	0,389	0,298	0,341	0,295

As figuras 5.10 e 5.11 e, as tabelas 5.18 e 5.19 mostram as variações no índice de vazios (e) do coeficiente de permeabilidade (k) com o volume de água

percolado. Nas figuras se reproduz novamente a etapa de percolação com licor, para destacar o efeito da percolação com água.

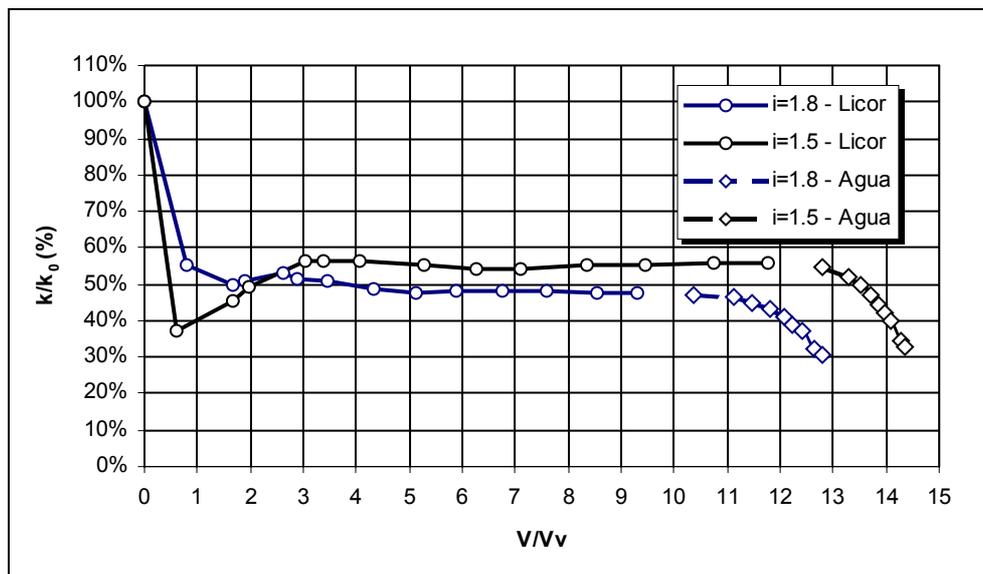


Figura 5.10 – Variação do coeficiente de permeabilidade – Ensaio Tipo 2

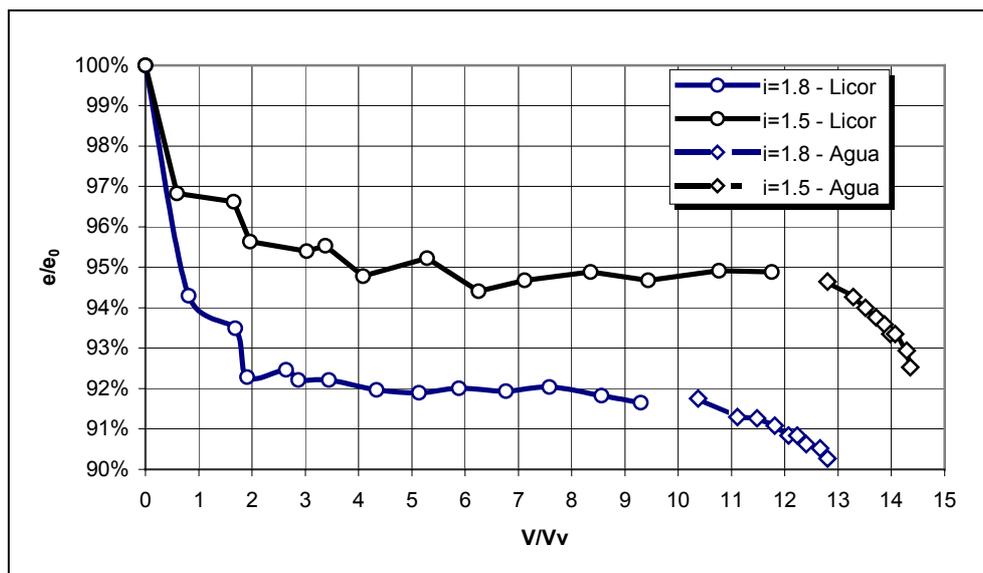


Figura 5.11 – Variação do índice de vazios – Ensaio Tipo 2

Tabela 5.18 – Resumo da variação de e, e k – Ensaio Tipo 2

Gradiente Hidráulico	e			Δe	k (cm/s)		
	inicial	final	final/inicial (%)		inicial	final	final/inicial (%)
1,80	0,431	0,424	98,37	0,007	$1,36 \times 10^{-5}$	$8,82 \times 10^{-6}$	64,98
1,50	0,428	0,418	97,66	0,010	$2,31 \times 10^{-5}$	$1,35 \times 10^{-5}$	58,66

Tabela 5.19 - Resumo da variação de Δe , nas diferentes etapas do ensaio – Ensaio Tipo 2

Gradiente Hidráulico	Δe_t	$\Delta e_{a+s}/\Delta e_t(\%)$	$\Delta e_L/\Delta e_t(\%)$	$\Delta e_A/\Delta e_t(\%)$
1,80	0,214	78,50	18,22	3,28
1,50	0,098	66,33	23,47	10,20

Δe_t = variação total de e, Δe_{a+s} = variação de e devido à sobrecarga e à percolação da água, Δe_L = variação de e pela percolação do licor, Δe_A = variação pela percolação de água.

5.2.3. Ensaio Tipo 3

O ensaio Tipo 3 foi executado nas células edométricas modificadas, sobre amostras amolgadas. Trabalhou-se com amostras preparadas com material passante na peneira #200 e compactadas estaticamente. A realização deste tipo de ensaio foi motivada pela intenção de observar com mais precisão o efeito do licor cáustico na fração fina do solo.

Para isto, escolheu-se material identificado como E1-CS3, sem contaminar, lavado e secado ao ar. Para fins de comparação entre estes três ensaios, decidiu-se compactar esta amostra a uma densidade e umidade que permitissem obter um índice de vazios igual ao índice de vazios médio da fração fina do solo do ensaio C₁ (Tipo 1). Para obter o índice de vazios da fração fina, usaram-se as formulas deduzidas no Apêndice 1, e determinaram-se por ensaio os valores de G_s das frações passantes e retidas na peneira # 200. Estes valores são apresentados a seguir,

Tabela 5.20 – Valores de G_s

Material	G _s
E1 - CS3 – Passante #200	2,709
E1 - CS3 – Retido #200	2,670

A mudança de célula de adensamento obedeceu a duas razões. Uma de origem simplesmente prática: a quantidade de material disponível não permitia a moldagem de amostras de grandes dimensões. A segunda razão foi que, neste caso, a ênfase do ensaio estava em observar as mudanças no comportamento do material fino, tais como à variação de massa (finos) com as diferentes concentrações de licor.

Aplicou-se um nível de tensões efetivas verticais de 1 kPa, somente com a finalidade de assegurar o contato do top-cap ao topo da amostra, e um gradiente

hidráulico de 1. A escolha do gradiente hidráulico e do carregamento aplicado, obedeceram à necessidade de dar condições de ensaio comparáveis aos três ensaios executados.

Este tipo de ensaio foi composto por três testes individuais, com as seguintes características:

Tabela 5.21 – Características dos ensaios edométricos Tipo 3.

Material	Concentração do licor	Gradiente Hidráulico
E1 – CS3 – Passante #200	$C_1 = 20 \text{ g/l}$	1
E1 – CS3 – Passante #200	$C_2 = 70 \text{ g/l}$	1
E1 – CS3 – Passante #200	$C_3 = 10 \text{ g/l}$	1

As características iniciais e finais dos corpos de prova são apresentadas na tabela a seguir,

Tabela 5.22 – Resumo dos índices físicos – Tipo 3

	C1		C2		C3	
	inicial	final	inicial	final	inicial	final
w = umidade (%)	13,03	24,96	12,64	24,68	13,18	22,82
D = diâmetro (cm)	7,12	7,12	7,15	7,15	7,10	7,10
H = altura (cm)	1,97	1,76	1,97	1,81	1,97	1,72
Vt = Volume total (cm ³)	78,44	70,08	79,10	72,67	77,99	68,10
Vs = Volume de sólidos (cm ³)	45,95	45,95	43,87	43,87	43,89	43,89
Vv = Volume de vazios (cm ³)	32,49	24,13	35,22	28,80	34,10	24,21
Vw = Volume de água (cm ³)	16,22	30,47	15,02	27,67	15,68	26,73
Va = Volume de ar (cm ³)	16,27	0,00	20,20	1,13	18,42	0,00
e = índice de vazios	0,707	0,525	0,802	0,656	0,777	0,552
n = porosidade	0,414	0,344	0,446	0,396	0,437	0,356
S = grau de saturação (%)	49,92	126,00	42,64	96,08	45,98	110,41

Da mesma maneira que nos ensaios Tipo 1, e Tipo 2, calculou-se a variação no coeficiente de permeabilidade e do índice de vazios, com o volume de licor percolado, os resultados são apresentados nas figuras 5.12 a 5.17 e nas tabelas 5.23 e 5.24. Nas tabelas, as denominações inicial e final identificam o valor dos parâmetros ao início e fim da etapa de percolação do licor.

Nas figuras, está representada a relação normalizada k/k_0 e e/e_0 . Onde o sub-índice 0 indica os valores dos índices para a amostra ao final da etapa de saturação com água, e k e e , os valores dos índices durante a etapa de

percolação do licor. O V é o volume percolado, é V_v e o valor do volume de vazios a cada instante de ensaio.

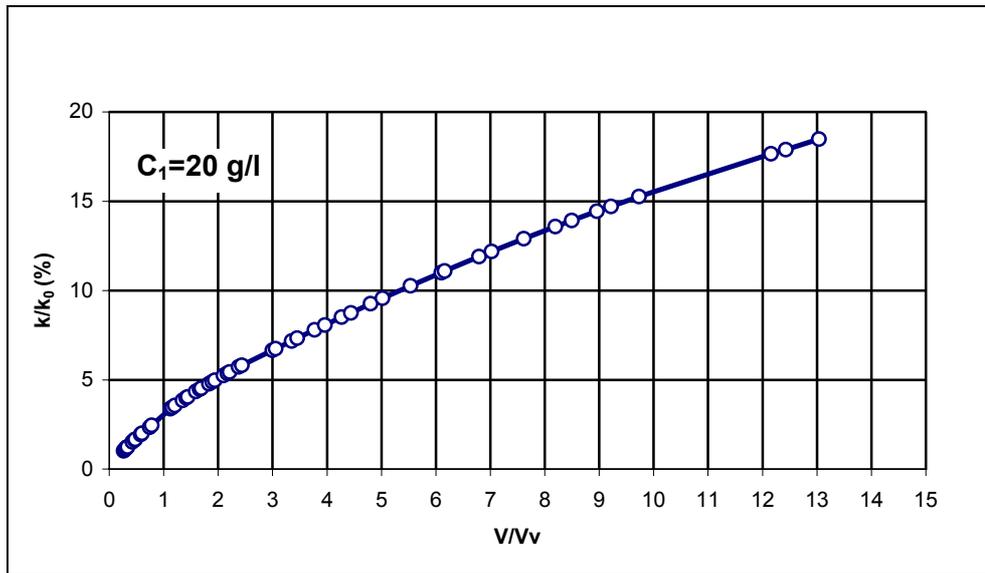


Figura 5.12 – Variação do coeficiente de permeabilidade para a concentração C_1 .

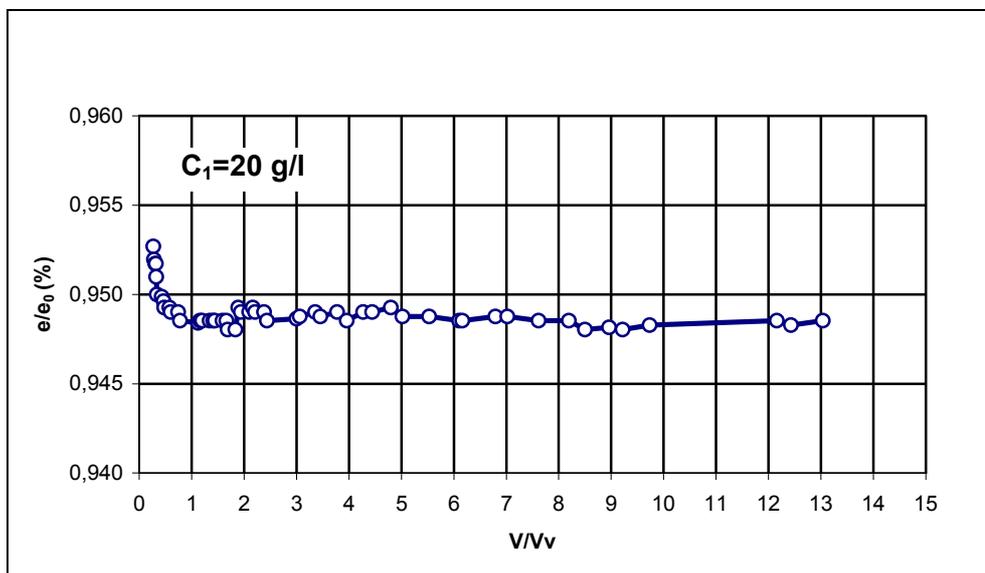


Figura 5.13 – Variação do índice de vazios para a concentração C_1

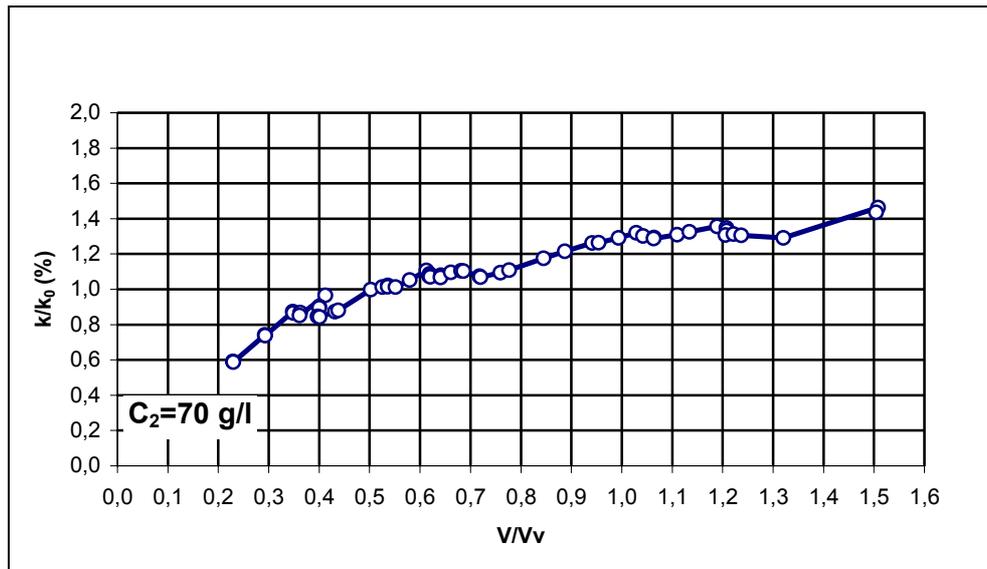


Figura 5.14 – Variação do coeficiente de permeabilidade para a concentração C_2

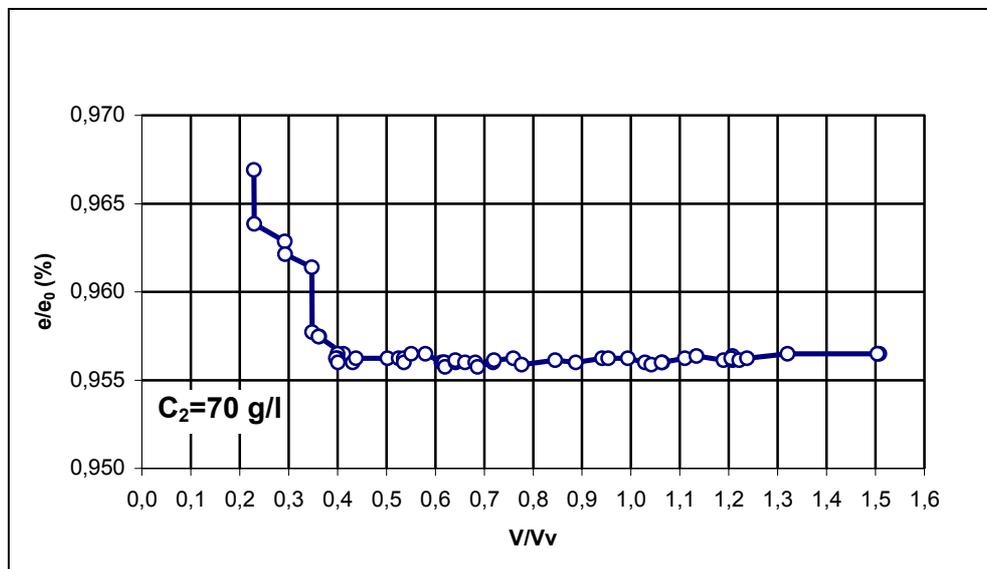


Figura 5.15 – Variação do índice de vazios para a concentração C_2

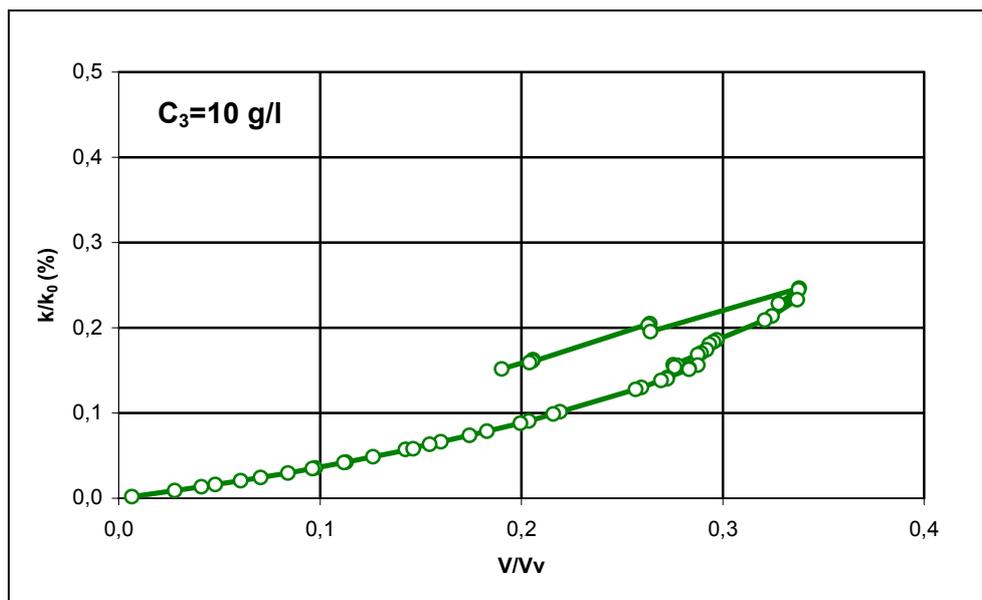


Figura 5.16 – Variação do coeficiente de permeabilidade para a concentração C_3

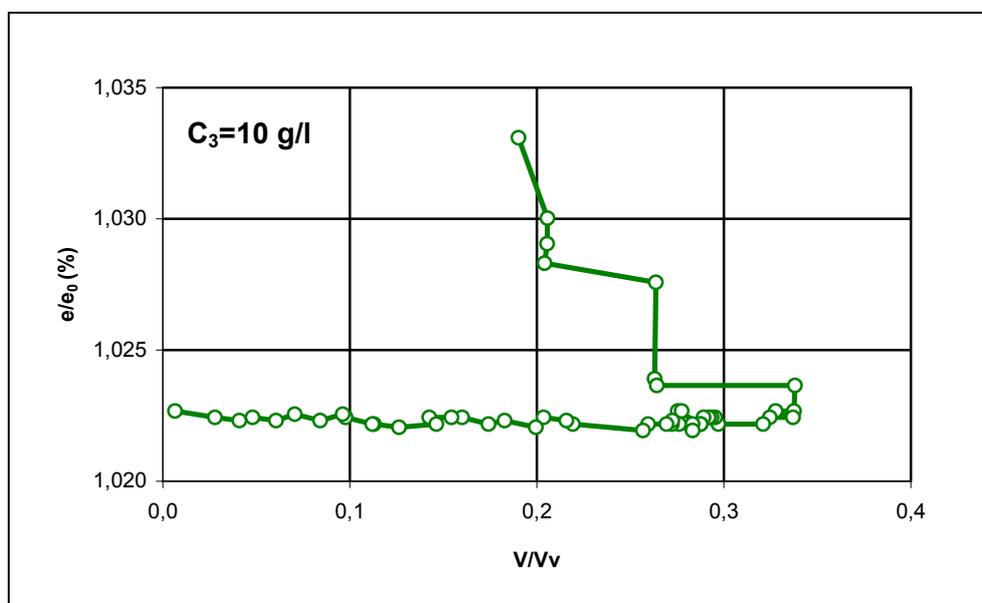


Figura 5.17 – Variação do índice de vazios para a concentração C_3

Tabela 5.23 – Resumo da variação de e , e k , para a etapa de percolação com licor.

Material	e			Δe	k (cm/s)		
	inicial	final	final/inicial %		inicial	final	final/inicial %
C_1	0,674	0,670	99,41	0,036	$7,87 \times 10^{-7}$	$1,42 \times 10^{-5}$	1.804,32
C_2	0,777	0,769	98,97	0,032	$6,90 \times 10^{-7}$	$1,68 \times 10^{-6}$	243,48
C_3	0,801	0,793	99,00	0,017	$6,29 \times 10^{-7}$	$2,33 \times 10^{-7}$	37,04

Tabela 5.24 - Resumo da variação total de Δe_t

Material	Δe_t
C ₁	0,182
C ₂	0,146
C ₃	0,225

5.3. Comentários finais

5.3.1. Ensaio Tipo 1

Em geral, o grau de saturação obtido pelas amostras foi de aproximadamente 90 por cento. Existiram alguns casos em que este valor ficou com valores menores graus de saturação final (finalizada a etapa de percolação de licor), ensaio C₁-amostra com $i=1,0$ e $0,5$. Este fato pode se dever ao fato de que as cargas hidráulicas aplicadas são baixas e o processo de saturação é feito por percolação de água

Existe também uma perda de água instantânea quando o corpo de prova é retirado da célula antes de ser pesado.

Com o intuito de diminuir esta última fonte de erro, procedeu-se a pesar a célula edométrica completa e fechada antes de desmontar os ensaios posteriores. Esta precaução foi tomada a partir do observado na desmontagem dos três primeiros corpos de prova, do ensaio C₁, razão pela qual estas amostras foram perdidas para os ensaios que requerem amostras não amolgadas, como a confecção de lâminas petrográficas ou ensaios de sucção.

5.3.2. – Ensaio Tipo 2

Como já foi explicado, o ensaio Tipo 2, executado nas amostras 1 e 2 do Ensaio C₁ -Tipo 1, envolveu a percolação de água após a percolação de licor.

A queda brusca observada no índice de vazios e no coeficiente de permeabilidade pode decorrer da lavagem de finos e acumulação na parte inferior da amostra. Este fato, entretanto, não pode ser verificado devido ao amolgamento dos corpos de prova ao serem desmontados.

5.3.3. – Ensaio Tipo 3

Diferentemente das células edométricas do Edômetro ADS, que são completamente fechadas, não tendo a amostra nem o licor contato com o ar atmosférico, as células edométricas modificadas têm um pequeno espaço entre a parede do rasgo circular da tampa e o *top-cap*, que fica em contato com o ar, durante a execução do ensaio. Nesse contato, notou-se durante o ensaio, a cristalização de material sólido de cor branca.

A partir de um determinado volume de licor percolado, na concentração C_3 , observou-se à cristalização do licor no espaço que ficava entre a parede da tampa e o *top-cap* e, devido a essa cristalização houve um aumento do atrito entre estas duas superfícies. Simultaneamente, esta cristalização, impediu a saída do licor da amostra. Estes fatos poderiam explicar o aumento do valor de e observado na figura 5.17.