

5. Análise dos deslocamentos verticais

Os deslocamentos verticais em aterros fundados em solos altamente compressíveis apresentam-se como uma das principais preocupações do engenheiro projetista. A busca de métodos que representem os deslocamentos verticais com confiabilidade, está sempre presente nas discussões da comunidade geotécnica.

Os principais objetivos das análises de deslocamentos em solos moles estão associados a determinação do recalque total (ρ_t) e a estimativa dos coeficientes de adensamento (c_h e c_v).

A obra em estudo trata-se de um aterro construído sobre uma camada de argila mole. Objetivando acelerar os recalques, foram instalados drenos horizontais (dreno Francês, distribuídos a cada 20 m) e drenos verticais (geodrenos, em distribuição quadrangular, espaçados em 1,5 m), na camada de argila mole. Adicionalmente foi imposta uma sobrecarga temporária em toda a extensão do aterro.

No presente capítulo estão apresentadas análises de deslocamentos verticais utilizando a teoria de adensamento de Terzaghi e o método de previsão de recalques de Asaoka (1978), modificado por Magnan e Deroy (1980). Os valores previstos serão comparados com os deslocamentos verticais medidos em campo. O monitoramento dos deslocamentos verticais foi realizado por 32 placas de recalque, instaladas no aterro e em suas redondezas.

Os coeficientes de adensamento vertical (c_v) e horizontal (c_h) previstos pelo método de Asaoka (1978) modificado por Magnan e Deroy (1980), serão comparados com os valores dos coeficientes de adensamento obtidos em ensaios de piezocone, realizados pela empresa Terratek, assim como com os valores determinados em ensaios de laboratório por Spannenberg (2003).

5.1 Deslocamentos verticais

A teoria de adensamento de Terzaghi propõe para o cálculo do recalque final em função dos parâmetros de compressibilidade (índice de compressão c_c ,

e índice de recompressão c_{re}), tensões iniciais (σ'_0) e finais (σ'_f), e história de tensões do depósito (σ'_{vm}).

O método de Asaoka modificado por Magnan e Deroy (1980), como apresentado no capítulo 2, é um método simples e prático, baseado em monitoramento de recalque no campo.

A seguir os resultados da presente análise serão apresentados e comparados por áreas do aterro.

Para a área L, foram instaladas 10 placas de recalque e 3 placas nas redondezas do aterro. A Tabela 22 apresenta a numeração das placas instaladas no aterro e nos arredores, as datas das leituras, e o intervalo de tempo, em dias, que as mesmas foram monitoradas.

Tabela 22 – Placas de recalque instaladas na área L.

Placa de Recalque	Datas de Leituras		Total de dias
	iniciais	finais	
PR – 05*	09/03/01	03/02/03	696
PR – 06	09/03/01	05/03/03	726
PR – 07	09/03/01	26/03/03	747
PR – 08	09/03/01	26/03/03	747
PR – 09	09/03/01	26/03/03	747
PR – 10	06/04/01	26/03/03	719
PR – 11	06/04/01	19/03/03	712
PR – 12	06/04/01	11/03/03	704
PR – 13	11/05/01	11/03/03	669
PR – 14	11/05/01	26/03/03	684
PR – 23**	23/08/03	26/03/03	215
PR – 30**	23/08/03	26/03/03	215

*placa danificada

A Figura 74 apresenta um resultado típico de monitoramento de campo em que o aterro foi construído em duas etapas. Os resultados apresentados nesta figura referem-se à placa de recalque RP - 07. A título de exemplo, apresenta-se na Figura 75, a metodologia sugerida pelo método de Asaoka, para a previsão do recalque final para a mesma placa. Os resultados das demais placas estão apresentados no anexo 2.

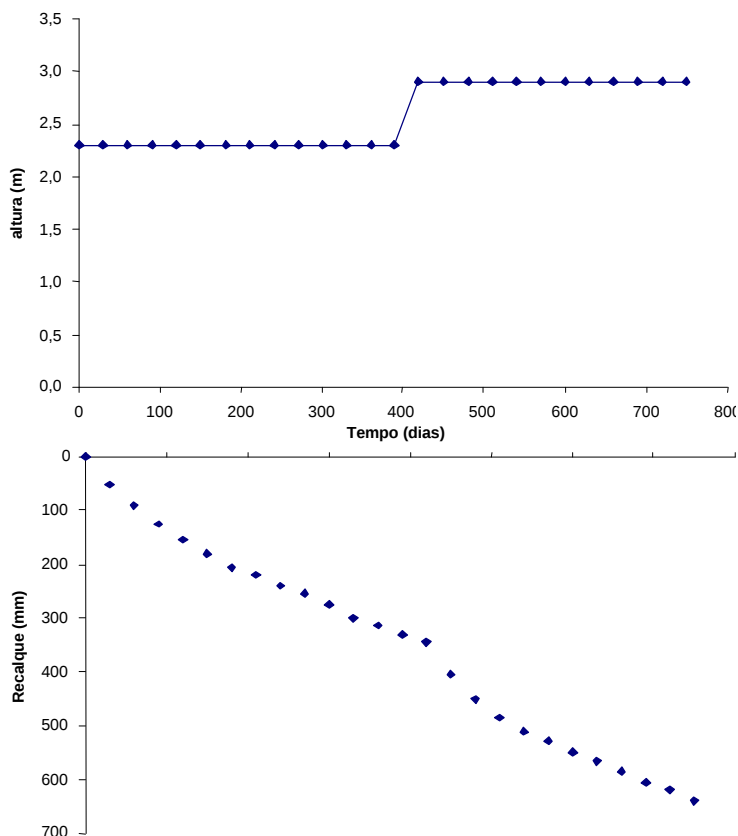


Figura 74 – Recalque x tempo x alteamento para placa PR – 07.

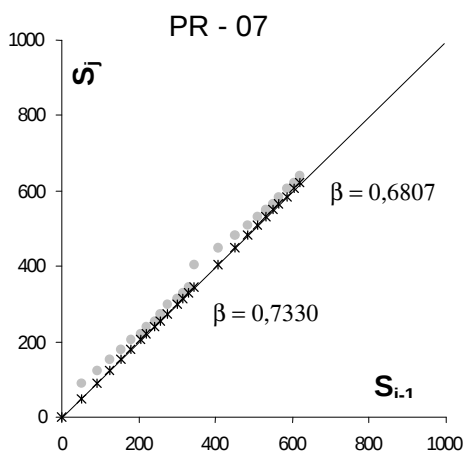


Figura 75 – Método de Asaoka PR – 07.

A Figura 76 compara os recalques medidos e os previstos pelo método de Asaoka, para diferentes etapas de alteamento do aterro. Nesta figura, está incluída a previsão de recalque total a partir da teoria de adensamento 1D de Terzaghi. Nesta previsão, considerou-se dois limites de espessura de camada ($H = 5 \text{ m}$ e $H = 6 \text{ m}$). Os índices de compressibilidade (c_c e c_r) e o índice de vazios inicial (e_i) foram estimados em ensaios de laboratório realizados por

Spanneberg (2003). A camada de argila mole foi subdividida em 3 camadas de espessuras iguais com valores de OCR, estimados por ensaios de piezocone, decrescentes com a profundidade e iguais a 2,0, 1,8 e 1,3.

Os resultados mostram, na maioria dos casos, diferenças entre o recalque medido e o previsto por Asaoka, inferiores a 20 %. No caso da placa PR – 06, a diferença entre a previsão de Asaoka e o recalque de campo, é atribuída ao fato de que o processo de adensamento encontrava-se em sua fase inicial. A comparação entre os recalques sugere, para esta placa, uma porcentagem média de adensamento de 40%. Ressalta-se que o método de Asaoka é recomendado para uma condição mínima de 60% de dissipação do excesso de poropressão gerado pelo carregamento (Asaoka, 1978).

Os elevados valores de recalque total previstos pela teoria de Terzaghi foram atribuídos aos elevados valores de compressibilidade utilizados nesta estimativa, assim como pelas hipóteses adotadas pelo método. Spannenberg (2003) comparou diversas campanha de laboratório realizadas nas baixada Fluminense e observou uma dispersão significativa tanto nos valores de c_c quanto nos valores de c_r .

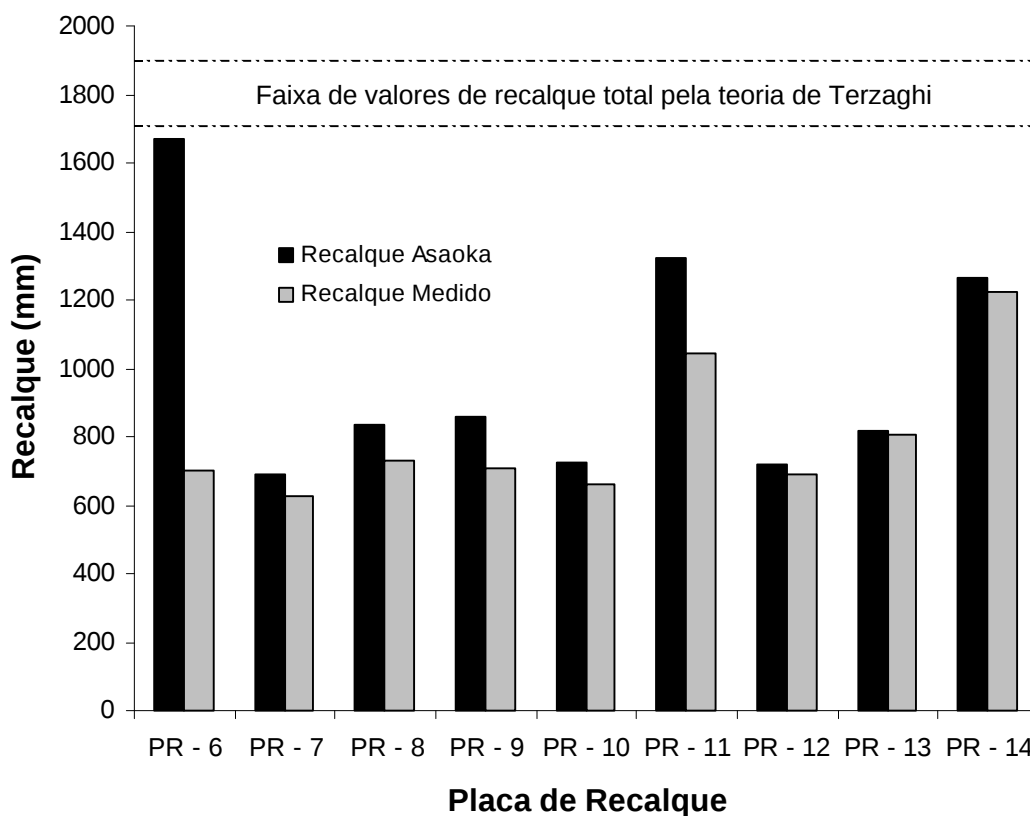


Figura 76 – Comparação de recalque (área L).

Os valores dos coeficientes de adensamento, estimados pelo método de Asaoka, estão apresentados na Tabela 23. Nesta tabela estão apresentados c_v para condição de drenagem puramente vertical e drenagem combinada. Os valores calculados para a condição de drenagem combinada referem-se ao coeficiente de adensamento horizontal.

Os valores de c_v apresentaram-se aproximadamente 100 vezes maiores que os calculados para a condição de drenagem combinada. Este resultado já era esperado, uma vez que a equação para a previsão de c_v pressupõe drenagem unidimensional. Já para a condição de drenagem combinada, admite-se a existência de fluxo vertical e horizontal.

Tabela 23 – Coeficientes de adensamento para área L.

Placa de Recalque	Coeficiente de adensamento	
	drenagem	
	Vertical (cv)	Combinada (ch)
PR – 05*	-	-
PR – 06	$1,75 \times 10^{-2}$	$2,93 \times 10^{-4}$
PR – 07	$2,02 \times 10^{-2}$	$3,39 \times 10^{-4}$
PR – 08	$2,02 \times 10^{-2}$	$3,39 \times 10^{-4}$
PR – 09	$1,75 \times 10^{-2}$	$2,93 \times 10^{-4}$
PR – 10	$1,03 \times 10^{-2}$	$2,49 \times 10^{-4}$
PR – 11	$1,21 \times 10^{-2}$	$2,93 \times 10^{-4}$
PR – 12	$1,88 \times 10^{-2}$	$3,16 \times 10^{-4}$
PR – 13	$2,02 \times 10^{-2}$	$3,39 \times 10^{-4}$
PR – 14	$1,82 \times 10^{-2}$	$4,39 \times 10^{-4}$
PR – 23	$1,03 \times 10^{-2}$	$2,49 \times 10^{-4}$
PR – 30	$1,21 \times 10^{-2}$	$2,93 \times 10^{-4}$

* placa danificada.

Da mesma forma que para a área L, a Tabela 24 e a Tabela 25 apresentam as placas de recalque instaladas para as áreas C e O, respectivamente.

Tabela 24 – Placas de recalque instaladas na área C.

Placa de Recalque	Datas de Leituras		Total de dias
	iniciais	finais	
PR – 01*	09/10/00	26/11/02	675
PR – 02*	09/10/00	04/10/02	808
PR – 03*	26/10/00	26/03/03	708
PR – 04	07/11/00	26/03/03	869
PR – 15	15/04/02	26/03/03	345
PR – 27	18/07/02	26/03/03	251
PR – 32	10/07/02	26/03/03	259

* placa danificada.

Tabela 25 – Placas de recalque instaladas na área O.

Placa de Recalque	Datas de Leituras		Total de dias
	iniciais	finais	
PR – 16	28/05/02	26/03/03	302
PR – 17	13/05/02	26/10/02	166
PR – 18	13/05/02	19/03/03	310
PR – 19	13/05/02	26/03/03	317
PR – 20	10/07/02	26/03/03	259
PR – 21	10/07/02	26/03/03	259
PR – 22	24/06/02	26/03/03	275
PR – 24	24/06/02	16/12/03	540
PR – 25	24/06/02	26/03/03	275
PR – 28	15/07/02	05/03/03	233
PR – 29*	-	-	126
PR – 31	15/07/02	26/03/03	254

* placa danificada.

As comparações entre os recalques medidos, previstos pelo método de Asaoka, e os calculados pela teoria de adensamento 1D de Terzaghi estão ilustradas, para área C, na Figura 77, e para a área O, na Figura 78. Para o cálculo do recalque final pela teoria de adensamento 1D de Terzaghi, os parâmetros de compressibilidade (c_c e c_r) e de história de tensões (OCR) utilizados, tanto para área C quanto para área O, foram os mesmos apresentados para a área L. As variações dizem respeito à espessura das camadas analisadas, que para a área C variaram de 4 m até 6 m e, para a área O, foram de 3 m a 6 m.

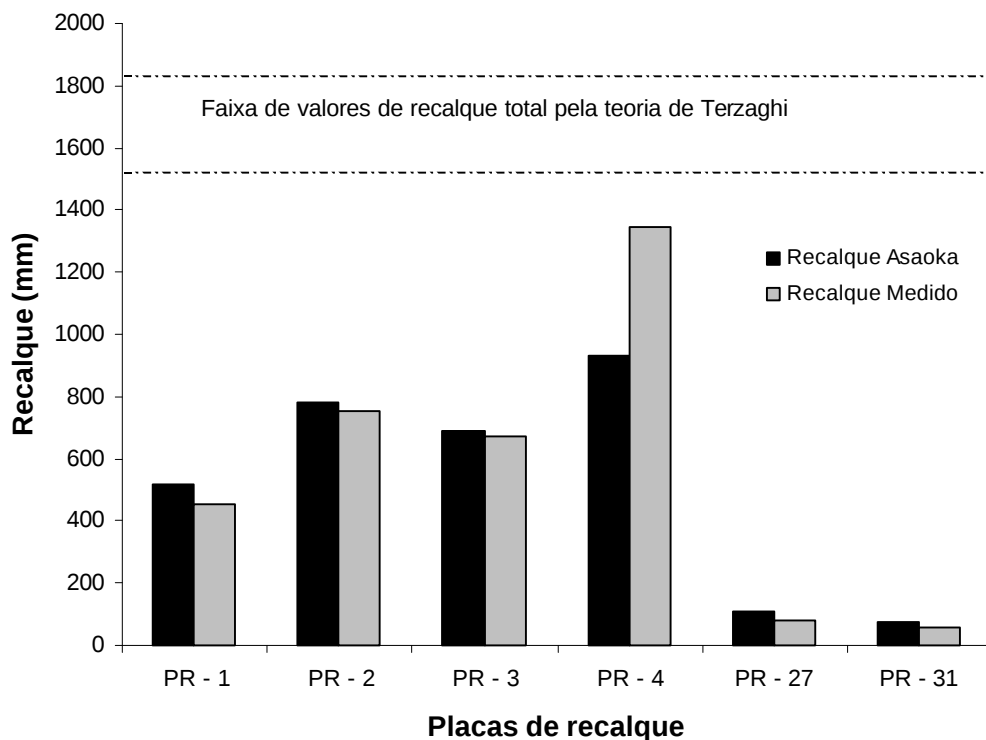


Figura 77 - Comparação de recalque (área C).

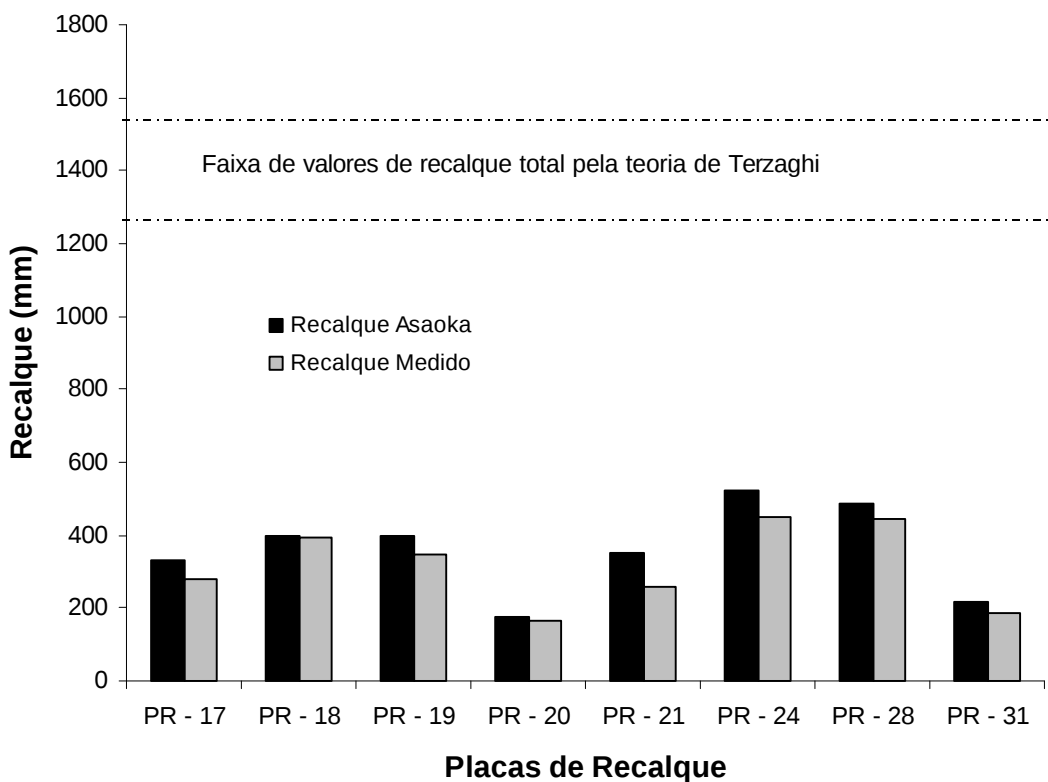


Figura 78 - Comparação de recalque (área O).

Os mesmos comentários, referentes à área L, se repetem para as áreas C e O, onde na maioria dos casos os resultados mostram diferenças inferiores a 20% entre o recalque medido e o previsto por Asaoka.

Nota-se na Figura 77 que, para o caso particular da placa de recalque PR – 04, o valor do recalque previsto pelo método de Asaoka foi inferior aos valores medidos no campo. Isso pode ser justificado pelo fato de que o método de Asaoka leva em consideração apenas o adensamento primário, e a placa de recalque PR – 04 (Figura 79) apresenta indicação de adensamento secundário, a partir de aproximadamente 450 dias.

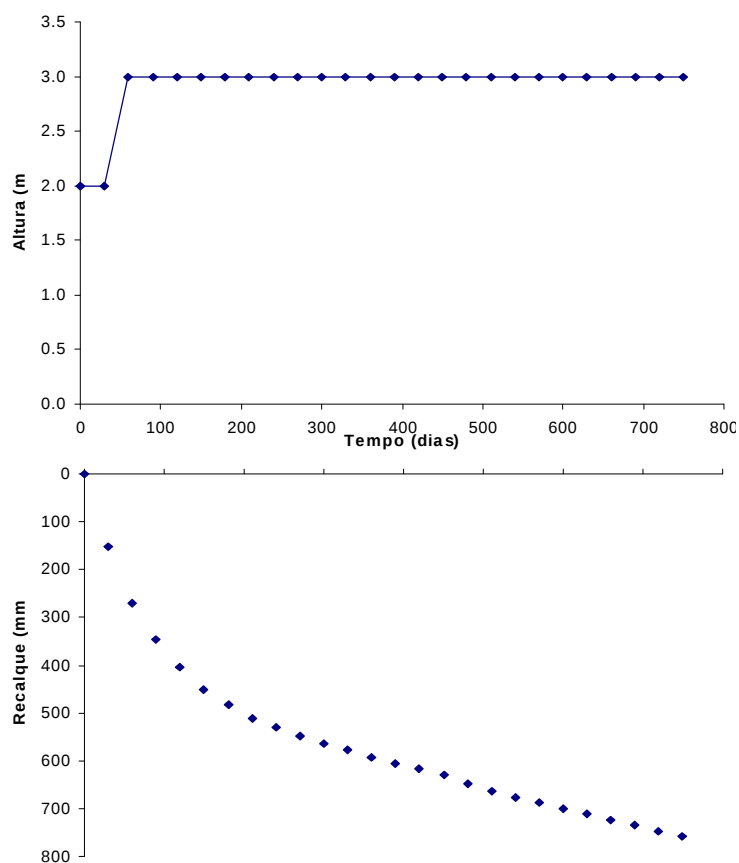


Figura 79 – Recalque x tempo x alteamento para placa PR – 04.

Os valores dos coeficientes de adensamento, estimados pelo método de Asaoka, para a área C, estão ilustrados na Tabela 26, e para a área O, na Tabela 27. Os valores dos coeficientes de adensamento (c_v e c_h) foram calculados para drenagem puramente vertical e para drenagem combinada e apresentaram-se, da mesma maneira que para área L.

Tabela 26 - Coeficientes de adensamento para área C.

Placa de Recalque	Coeficiente de adensamento drenagem	
	Vertical (cv)	Combinada (ch)
PR – 01*	$8,99 \times 10^{-3}$	$3,39 \times 10^{-4}$
PR – 02*	$1,50 \times 10^{-2}$	$3,63 \times 10^{-4}$
PR – 03*	$2,17 \times 10^{-2}$	$3,63 \times 10^{-4}$
PR – 04	$2,02 \times 10^{-2}$	$3,39 \times 10^{-4}$
PR – 15	-	-
PR – 27	$1,40 \times 10^{-2}$	$3,39 \times 10^{-4}$
PR – 32	$2,31 \times 10^{-2}$	$3,88 \times 10^{-4}$

* placas danificadas

Tabela 27 - Coeficientes de adensamento para área O.

Placa de Recalque	Coeficiente de adensamento drenagem	
	Vertical (cv)	Combinada (ch)
PR – 16	$1,46 \times 10^{-2}$	$5,50 \times 10^{-4}$
PR – 17*	$1,46 \times 10^{-2}$	$5,50 \times 10^{-4}$
PR – 18	$1,71 \times 10^{-2}$	$4,13 \times 10^{-4}$
PR – 19	$1,09 \times 10^{-2}$	$4,13 \times 10^{-4}$
PR – 20	$1,50 \times 10^{-2}$	$3,63 \times 10^{-4}$
PR – 21	$1,31 \times 10^{-2}$	$4,93 \times 10^{-4}$
PR – 22	-	-
PR – 24	$1,31 \times 10^{-2}$	$4,93 \times 10^{-4}$
PR – 25	-	-
PR – 26	-	-
PR – 28	$3,46 \times 10^{-2}$	$5,80 \times 10^{-4}$
PR – 29*	-	-
PR – 31	$2,77 \times 10^{-2}$	$4,65 \times 10^{-4}$

* placas danificadas.

A Figura 80 apresenta, em planta, os valores dos coeficientes de adensamento verticais (c_v) calculados a partir do método de Asaoka, para as 3 áreas.

Para todas as áreas do aterro (L, C e O), os valores do coeficiente de adensamento vertical (c_v) previstos pelo método de Asaoka, modificado por Magnan e Deroy (1980) e determinados em ensaios de dissipação de piezocone, apresentaram valores iguais a $2,5 \times 10^{-2} \text{ cm}^2/\text{s}$.

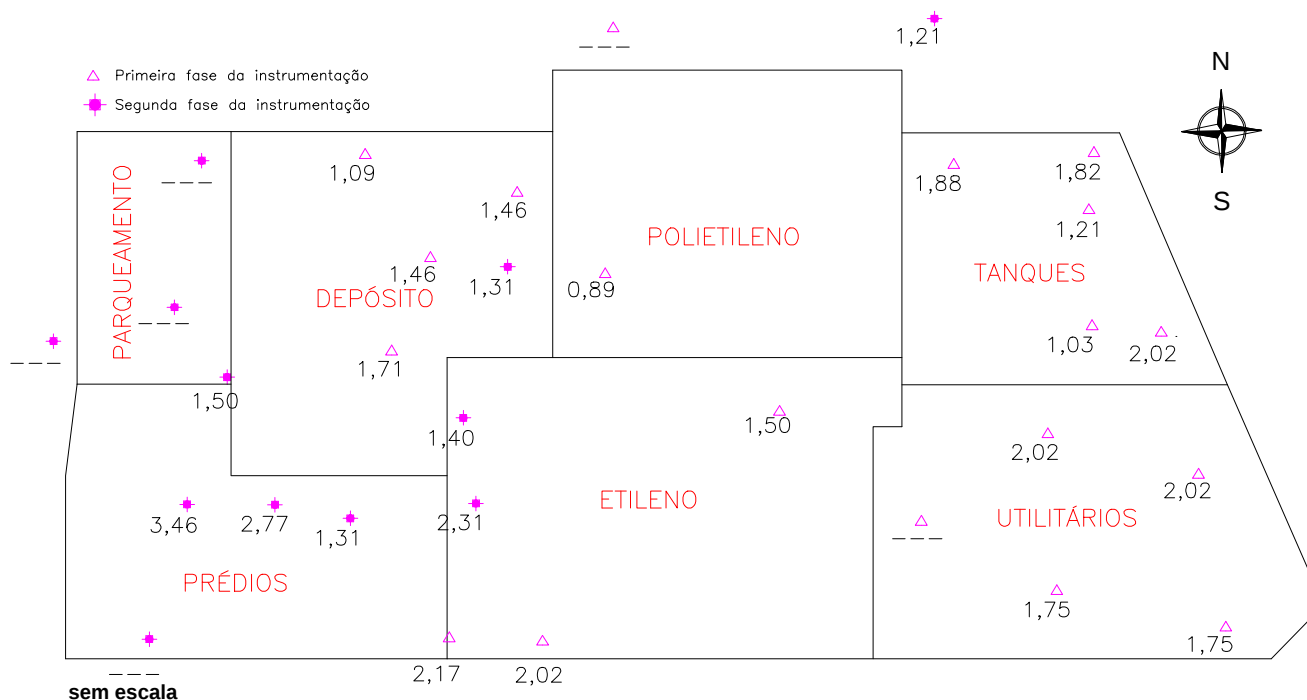


Figura 80 - Valores de c_v em planta

Para os valores do coeficiente de adensamento horizontal, os valores de Asaoka foram de aproximadamente $4 \times 10^{-4} \text{ cm}^2/\text{s}$. Estes valores são inferiores aos publicados por Danziger e outros (1997) para a região de Sarapuí ($4 \times 10^{-3} \text{ cm}^2/\text{s}$) em ensaios de piezocone.

Por outro lado, os ensaios de laboratório realizados por Spannenberg (2003) apresentaram valores de coeficiente de adensamento vertical (c_v) 100 vezes menores que os previstos e relatados anteriormente. Isso se justifica pelo fato de que equação para a previsão de c_v pressupõe drenagem unidimensional.

Os recalques monitorados nas placas de recalque registraram, durante períodos que variam de 8 a 30 meses, deslocamentos de até 1225 mm para a área L, 1342 mm para área C e 448 mm para área O. Isto corresponde a um grau de adensamento acima de 60 %, exigido como recomendação mínima para utilização do método de Asaoka. Desta forma, o recalque final estimado apresentou concordância satisfatória, com erros inferiores a 20 %.