https://doi.org/10.4322/cobramseg.2022.0694
ISBN: 978-65-89463-30-6

XX Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica
IX Simpósio Brasileiro de Mecânica das Rochas
IX Simpósio Brasileiro de Engenheiros Geotécnicos Jovens
VI Conferência Sul Americana de Engenheiros Geotécnicos Jovens
15 a 18 de Setembro de 2020 – Campinas - SP

ANÁLISE DO TRANSPORTE POR DIFUSÃO EM BARREIRA IMPERMEABILIZANTE DE ARGILA E GEOMEMBRANA PARA ATERROS SANITÁRIOS

Ivan Almeida Queiroz
Engenheiro Civil, Universidade Católica de Brasília (UCB), Brasília, DF, Brasil, ivan.aqengenharia@gmail.com

Sylvia Regina Corrêa Brant Pereira de Jesus
Doutora em Geotecnia (UnB), Universidade Católica de Brasília (UCB), Brasília, DF, Brasil, sylviarcbrant@gmail.com

RESUMO: Neste artigo, estudou-se o mecanismo de difusão no transporte de contaminantes no conjunto solo/geomembrana por meio de simulações com Método dos Elementos Finitos no *software* FlexPDE. Realizaram-se análises de sensibilidade dos coeficientes de difusão do *liner* argiloso com a representação de duas simulações para um tempo de análise de 100 anos. Compararam-se os resultados de concentração do contaminante obtidos com o uso da geomembrana com os resultados do trabalho de Queiroz e Jesus (2019), que não contemplava o uso conjunto de um geocomposto. Com isso, verificou-se como a variação na ordem de grandeza do coeficiente de difusão interfere no avanço do contaminante, bem como a influência da geomembrana nestes resultados. Observou-se que os solos com menores coeficientes de difusão foram mais eficientes para a utilização como barreira impermeabilizante e ainda que a geomembrana aumenta de forma significativa essa eficiência.

PALAVRAS-CHAVE: Difusão, Transporte de Contaminantes, Método dos Elementos Finitos, FlexPDE.

ABSTRACT: In this paper, the diffusion mechanism in the transport of contaminants in the soil / geomembrane set was studied through Finite Element Method simulations with the *software* FlexPDE. Sensitivity analyses of the clayey liner diffusion coefficients were performed with the representation of three simulations for an analysis time of 100 years. The results of the concentration of the contaminant obtained with the use of the geomembrane were compared with the results of a similar paper that did not contemplate the joint use of a geocomposite. Thus, it was verified how the variation in the order of magnitude of the diffusion coefficient interferes with the advance of the contaminant, as well as the influence of the geomembrane in these results. It was observed that soils with lower diffusion coefficients were more efficient for use as a waterproofing barrier, and that the geomembrane significantly increases this efficiency.

KEYWORDS: Diffusion, Finite Element Method, Contaminant, FlexPDE.

1 Introdução

As obras de grande porte têm reduzido cada vez mais o impacto no meio ambiente. Esse fato se deve principalmente ao avanço da ciência e da tecnologia que, em conjunto, oferecem grandes benefícios para estas obras e seus respectivos projetos. Assim, o conhecimento dos fatores intervenientes em cada obra permite, desde a fase de planejamento, uma otimização quanto à redução do impacto ambiental.

Um exemplo comum de obra de grande porte é o aterro de resíduos, que visa à disposição de resíduos e seu devido acondicionamento. Dessa forma, sabe-se que este deve ser projetado e operado de forma a

ISBN: 978-65-89463-30-6

controlar a emissão de contaminante para o meio ambiente, com a finalidade de reduzir a possibilidade de ocorrer poluição das águas superficiais e subterrâneas. Boscov (2008) afirma que os aterros bem projetados são construídos com uma base impermeável, por exemplo, uma camada de argila e/ou revestimentos, podendo ainda ser o próprio solo natural, eventualmente acrescidos de mantas sintéticas impermeáveis ou de geocompostos, Têm-se, portanto, como importantes fatores, o conhecimento dos mecanismos envolvidos no transporte de contaminantes através do solo, tais quais, dentre outros, o fenômeno da advecção e o da difusão.

Albarède (2011) descreve que, em termos gerais, a advecção corresponde ao transporte de um elemento com velocidade de deslocamento igual à do meio em que ele se encontra e a difusão, ao seu deslocamento em relação ao meio, e complementa afirmando que o transporte difusivo é uma transferência de massa em pequenas distâncias, causada pela agitação térmica dos átomos ou pela turbulência do meio. Queiroz e Jesus (2019) destacam ainda que a difusão ocorre mesmo na ausência de movimento hidráulico da solução, e que apenas cessa quando os gradientes de concentração deixam de existir, conforme apresentado na Figura 1.

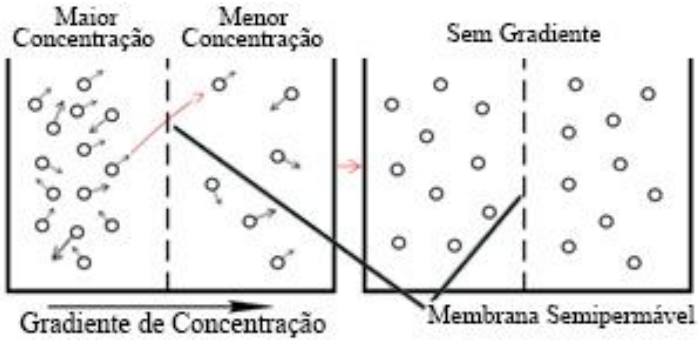

Figura 1. Gradiente de Concentração (Modificado: Queiroz e Jesus, 2019).

Com base no apresentado, tem-se por objetivo geral no presente artigo analisar o fenômeno de difusão no transporte de contaminante em solos com a utilização de geossintético por meio de simulação numérica com elementos finitos.

2 Metodologia

Neste artigo foi proposta a solução numérica do problema de transporte difusivo unidimensional de contaminantes utilizando-se do Método dos Elementos Finitos (MEF) por meio do *software* FlexPDE. Utilizaram-se como base dados do artigo de Queiroz e Jesus (2019). Realizaram-se ainda análises comparativas entre os resultados obtidos nos dois artigos

A difusão do contaminante foi analisada apenas na direção y. A equação da difusão utilizada é representada na Eq.1:

$$\frac{\partial C}{\partial t} - D\frac{\partial^2 C}{\partial y^2} = 0 \qquad (1)$$

onde:
c = concentração de contaminante;
D = coeficiente de difusão (m²/s);
t = tempo (segundos);

ISBN: 978-65-89463-30-6

Para este estudo, foi feito um modelo simulando a barreira impermeabilizante de um aterro sanitário composta por *liner* argiloso e geomembrana. Definiu-se parâmetros para a descrição do problema estudado, como espessura e coeficiente de difusão do *liner*, da geomembrana e do solo natural.

A geometria do domínio de análise para modelagem é bidimensional, retangular, com dimensões de um metro de comprimento por dois metros de altura, tendo o *liner* argiloso espessura de 60 cm e a geomembrana espessura de 1 cm. A análise foi feita com a representação de uma camada de *liner* argiloso seguido da geomembrana e do solo natural. Destaca-se que a espessura da geomembrana foi definida devido a uma limitação do processamento de dados da versão utilizada do *software* FlexPDE, que requer que a região delimitada para a geomembrana possua, no mínimo, 1 cm.

Determinaram-se pontos ao longo da geometria de domínio de forma a monitorar as alterações do contaminante ocorridas ao longo do tempo. Os pontos são: um na parte superior da região do *liner* argiloso (ponto d), dois na região central, próximos à interface entre a geomembrana e o solo natural (pontos c e b), e um na parte inferior da região do solo natural (ponto a), determinou-se ainda como condição inicial para este problema que, a concentração inicial de contaminante era zero (C=0) em toda a sua extensão; as condições de contorno utilizadas e as demais informações supracitadas estão especificadas na Figura 2. Destaca-se que $\partial C/\partial n$ representa o gradiente de concentração, e C, a concentração inicial de contaminante.

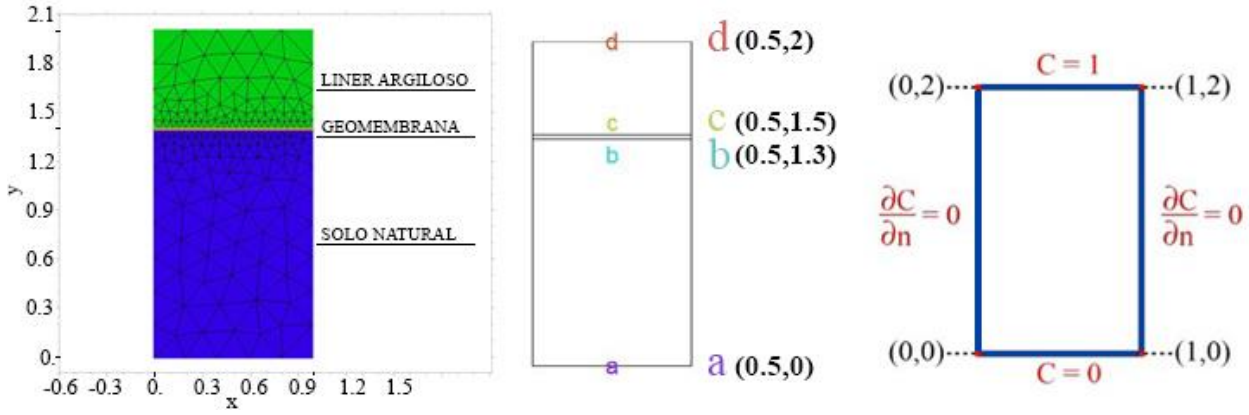

Figura 2. Barreira Impermeabilizante de solo constituída por *liner* argiloso e geomembrana, coordenadas dos pontos preestabelecidos e condições de contorno do problema, respectivamente.

As características do solo natural, do *liner* argiloso são apresentadas nas Tabelas 1 e 2, respectivamente. O tempo total de simulação foi de 100 anos.

Tabela 1. Parâmetros do Solo Natural (Queiroz e Jesus, 2019).

Camada	Tipo de Solo	Coeficiente de Difusão (m²/s)
Solo Natural	Areia/Bentonita (90/10%)	7,00E-10

Tabela 2. Parâmetros do *Liner* Argiloso (Queiroz e Jesus, 2019).

Simulação	Camada - Liner Argiloso	Coeficiente de Difusão (m²/s)
1ª Simulação	*Areia (100%)*	7,00E-09
2ª Simulação	Areia/Bentonita (90/10%)	7,00E-10

Destaca-se que as simulações referentes aos coeficientes de difusão de D = $7\text{x}\,10^{-11}$ m²/s e D = $7\text{x}\,10^{-12}$ m²/s realizadas no artigo de Queiroz e Jesus (2019) não foram contempladas neste artigo com o uso da geomembrana, pois naquele já apresentaram, apenas com o *liner* argiloso, significativa influência quanto à percolação do contaminante.

Adotou-se neste artigo um valor de coeficiente de difusão de 4.8, já para a ordem de grandeza, utilizou-se como base uma das apresentadas no artigo de Rowe at. all (1995), como apresentado na Tabela 3.

ISBN: 978-65-89463-30-6

Tabela 3. Parâmetros da Geomembrana.

Camada	Espessura	Coeficiente de Difusão (m²/s)
Geomembrana	1 cm	4,8E-12

3 Resultados

Para o início da apresentação dos resultados, tem-se a Figura 3, representando a concentração de contaminante no tempo t = 0 anos, destaca-se que é idêntica em todas as análises, podendo-se verificar a compatibilidade das condições iniciais e de contorno previstas.

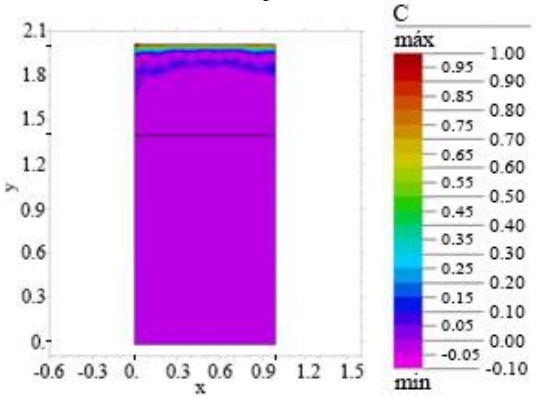

Figura 3. Concentração de contaminante para T = 0 anos.

Destaca-se que, os resultados gráficos apresentados nas Figuras 5, 7, 8 e 9 têm, para os pontos preestabelecidos, a e d, valores constantes, assim, apresentam concentração C = 0 e C = 1 (100%), respectivamente, apontando que o contaminante, depositado no ponto d, não atravessou toda a geometria do domínio, e ainda que o tempo T, nos gráficos, tem unidade em segundos (s).

Assim, na primeira simulação, em que o *liner* argiloso possui coeficiente de difusão D = 7x 10^{-9} m²/s, tem-se o comportamento do contaminante representado pelas Figuras 4 e 5, que representam a concentração de contaminante para 15, 45 e 100 anos, respectivamente; e ainda o gráfico concentração *versus* tempo para este coeficiente de difusão em T = 100 anos.

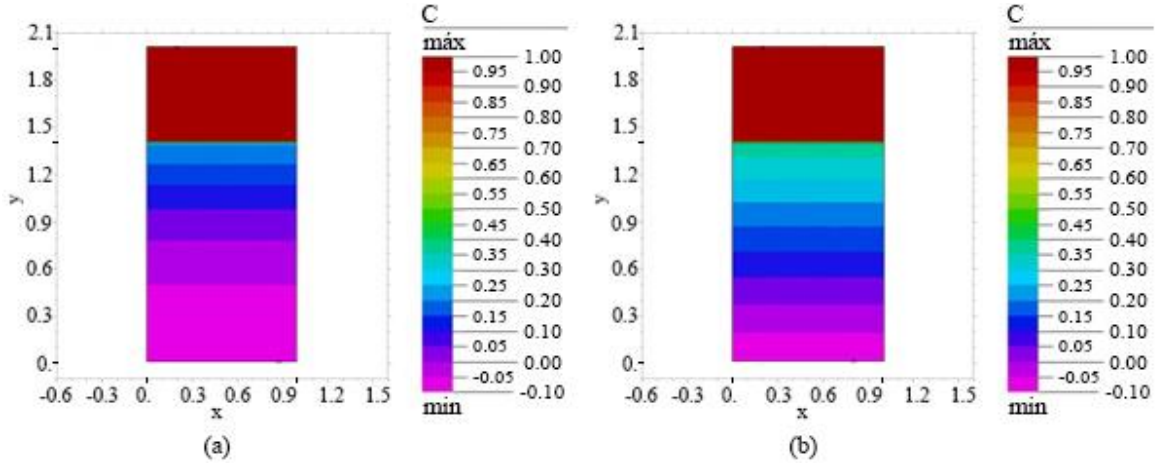

Figura 4. Concentrações de contaminante: (a) Simulação com *liner* argiloso: D = 7x 10^{-9} m²/s e T = 15 anos; (b) Simulação com *liner* argiloso: D = 7x 10^{-9} m²/s e T = 45 anos.

ISBN: 978-65-89463-30-6

Observa-se que, para este coeficiente de difusão do *liner* argiloso, o contaminante sofreu pouca resistência em sua percolação ao longo do *liner*, percebe-se então que, após 15 anos, o contaminante já havia ultrapassado todo o *liner* argiloso e atingido a interface *liner* argiloso/geomembrana.

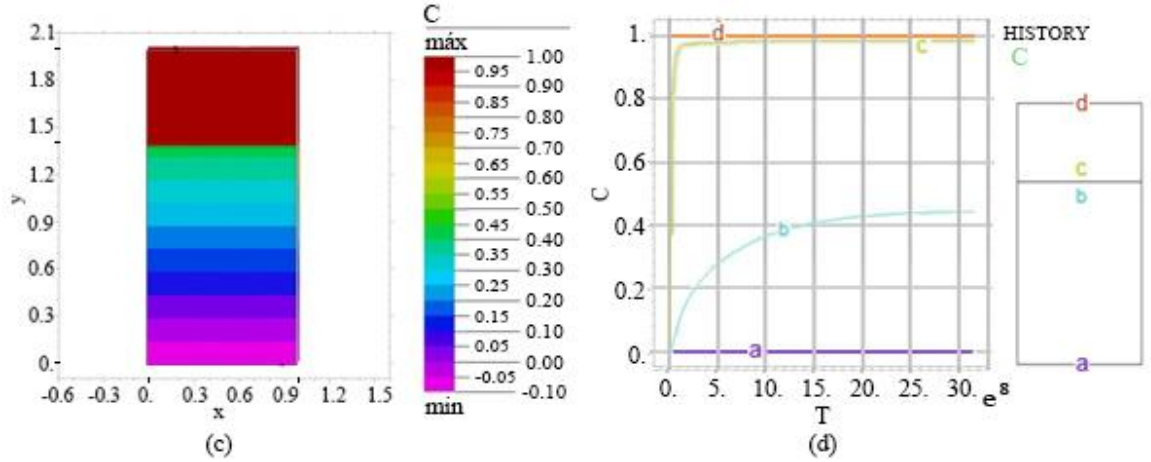

Figura 5. Concentração de contaminante e Gráfico: (c) Simulação com *liner* argiloso: D = 7x 10^{-9} m²/s e T = 100 anos; (d) Gráfico concentração *versus* tempo para T = 100 anos.

Posteriormente, no intervalo entre a primeira e a última representação, percebe-se que, a concentração de contaminante que ultrapassou a geomembrana é consideravelmente inferior, e que a percolação deu-se de forma mais lenta. Pode-se atribuir tal comportamento à diferença de coeficiente de difusão entre o *liner* argiloso e o solo natural, tendo este uma ordem de grandeza menor que aquele, e também à geomembrana e seu respectivo coeficiente de difusão. Destaca-se que a influência da geomembrana será mais bem analisada posteriormente, nas comparações com os resultados do artigo de Queiroz e Jesus (2019).

O gráfico da Figura 5 d apresenta para esta simulação, nos pontos preestabelecidos, as alterações na concentração de contaminante ao longo do tempo determinado. Verifica-se assim que, no ponto b, a concentração atinge pouco mais de 40% em um período aproximado de 48 anos. No ponto c, por sua vez, observa-se inicialmente uma concentração nula e um aumento significativo de pouco mais que 95% já em um curto período de aproximadamente 4 anos. Após esses períodos, as concentrações tendem a permanecer constantes.

Na segunda simulação, diferente da primeira, apresenta-se o coeficiente de difusão D = 7x 10^{-10} m²/s, os tempos de análise permanecem os mesmos e são apresentados pelas Figuras 6 e 7.

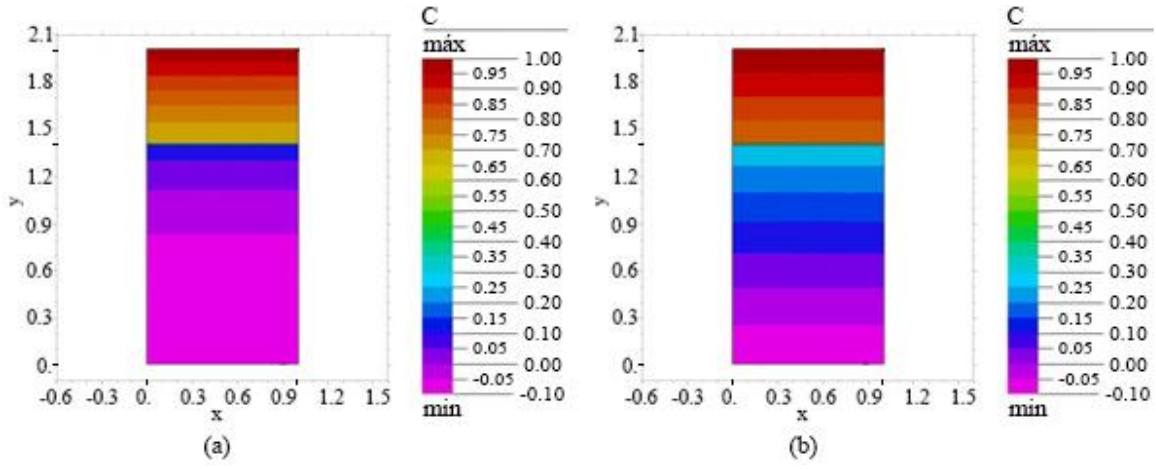

Figura 6. Concentrações de contaminante: (a) Simulação com *liner* argiloso: D = 7x 10^{-10} m²/s e T = 15 anos; (b) Simulação com *liner* argiloso: D = 7x 10^{-10} m²/s e T = 45 anos.

ISBN: 978-65-89463-30-6

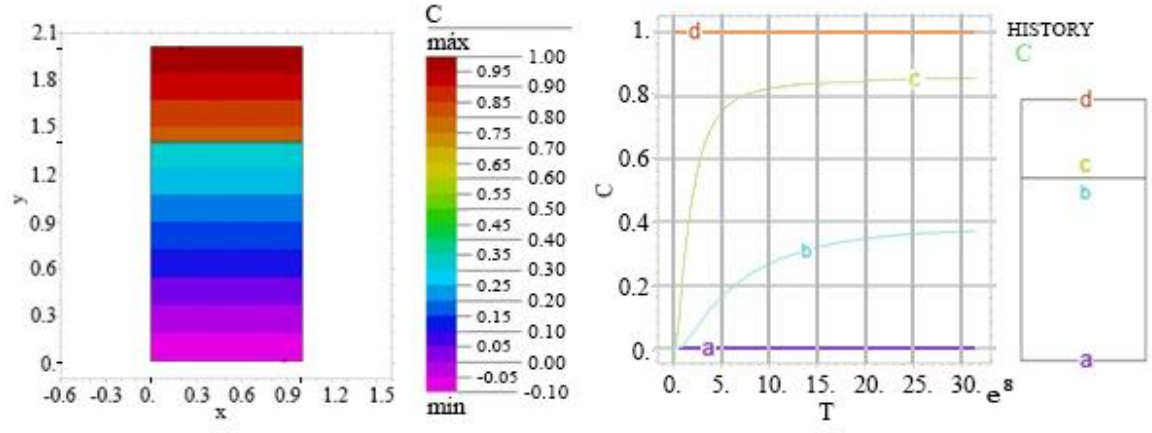

Figura 7. Concentração de contaminante e Gráfico: (c) Simulação com *liner* argiloso: D = 7x 10^{-10} m²/s e T = 100 anos; (d) Gráfico concentração *versus* tempo para T = 100 anos

Para o tempo de 100 anos, manteve-se a resistência quanto à percolação, e, neste caso, sendo os coeficientes de difusão do solo natural e do *liner* argiloso iguais, esperava-se uma certa linearidade na percolação do contaminante ao longo de toda a geometria de domínio, o que não ocorreu. Assim, atribui-se essa não-linearidade observada, e a visível redução na concentração de contaminante percolado, à presença da geomembrana e por seu coeficiente de difusão apresentar ordem de grandeza inferior aos acima citados.

O gráfico da Figura 7 d apresenta para esta simulação, nos pontos preestabelecidos, as alterações na concentração de contaminante ao longo do tempo determinado. Observa-se que, no ponto b, para um mesmo período de aproximadamente 48 anos, como na primeira análise gráfica, a concentração de contaminante teve um aumento de pouco mais de 30%. Já no ponto c, diferente da primeira análise, observa-se um aumento mais significativo somente após um período superior a 15 anos, dessa forma, tem-se em aproximadamente 23 anos, um aumento de 80% na concentração de contaminante. Verifica-se assim, a influência dos dois coeficientes de difusão utilizados para as duas simulações.

3.1 Análise Comparativa de Resultados: influência do uso de geomembrana

Com os resultados apresentados na seção 3 deste artigo, propõem-se análises comparativas entre estes resultados e os apresentados por Queiroz e Jesus (2019). Os autores realizaram pesquisa semelhante, com estudo de difusão, mas sem considerarem o uso de geomembrana na barreira impermeabilizante. Foram utilizados os mesmos parâmetros para a geometria do domínio, para os pontos de análises, para os coeficientes de difusão para o solo natural e para os diferentes tipos de solos utilizados como *liner* argiloso.

As Figuras 8 e 9 apresentam os gráficos de concentração *versus* tempo obtidos para as simulações dos dois artigos.

ISBN: 978-65-89463-30-6

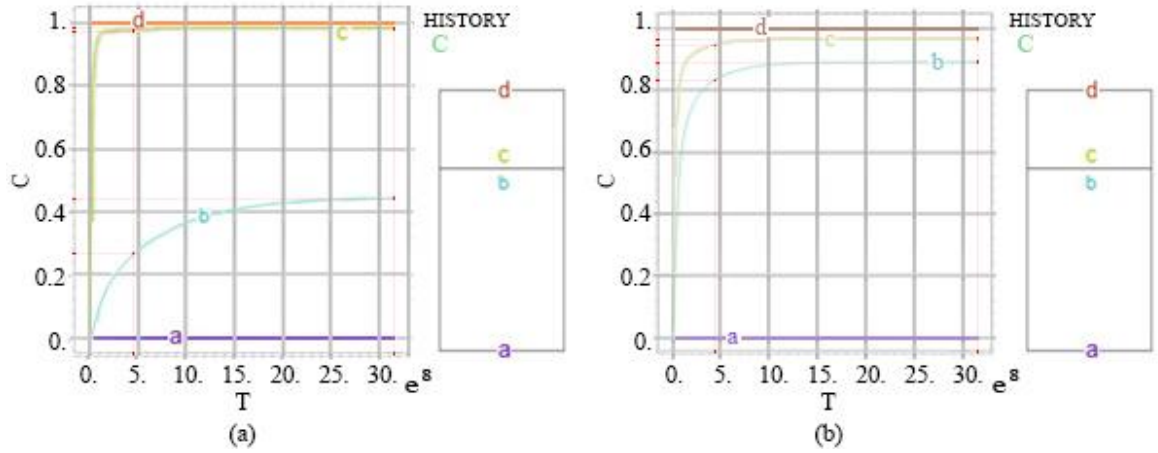

Figura 8. Gráficos concentração *versus* tempo: (a) Simulação com *liner* argiloso*:* D = 7x 10^{-9} m²/s com geomembrana; (b) Simulação com *liner* argiloso*:* D = 7x 10^{-9} m²/s sem geomembrana.

Verifica-se no gráfico da Figura 8 a que a diferença percentual para um período de aproximadamente 15 anos, entre os pontos de análise c e b, foi próxima de 72%, já no gráfico da Figura 8 b, a diferença percentual, para os mesmos pontos e mesmo período de análise, foi de aproximadamente 13%. Com o decorrer do período analisado, as concentrações tenderam a estabilizarem-se, dessa forma, em 100 anos, continuou existindo uma diferença percentual, porém, de 56% para o gráfico da Figura 8 a e 8% para o gráfico da Figura 8 b, aproximadamente. Atribui-se a essa diferença comparativa de 16% (em 15 anos) e 5% (em 100 anos) à utilização da geomembrana, abstração feita do *liner* argiloso tratado nas análises da seção 3.

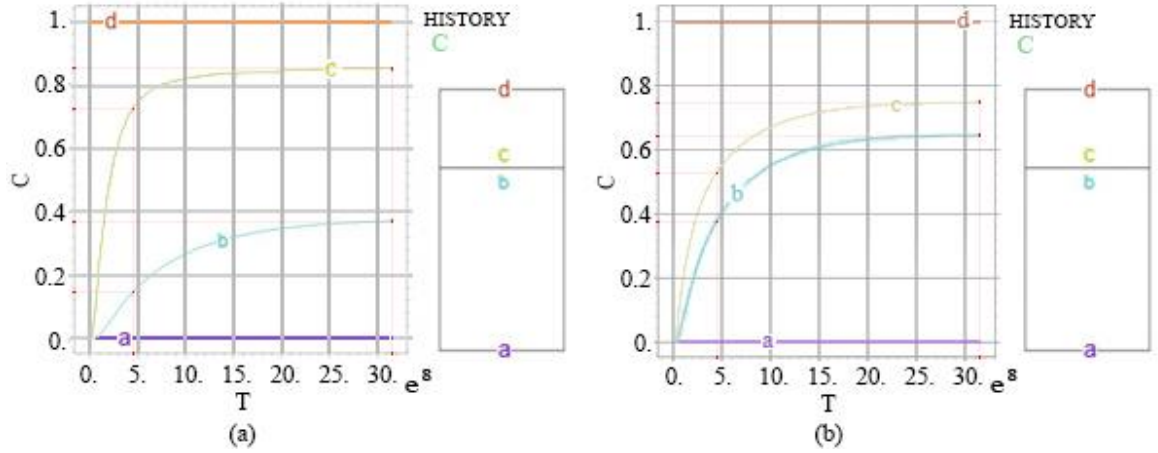

Figura 9. Gráficos concentração *versus* tempo: (a) Simulação com *liner* argiloso*:* D = 7x 10^{-10} m²/s com geomembrana; (b) Simulação com *liner* argiloso*:* D = 7x 10^{-10} m²/s sem geomembrana.

Verifica-se no gráfico da Figura 9 a que a diferença percentual para um período de aproximadamente 15 anos, entre os pontos de análise c e b, foi de aproximadamente 59%, já no gráfico da Figura 9 b, a diferença percentual, para os mesmos pontos e mesmo período de análise, foi próxima de 15%. Após cerca de 65 anos, as concentrações tenderam a estabilizarem-se, assim, no período de 100 anos, continuou existindo uma diferença percentual, porém, de 47% para o gráfico da Figura 9 a e 12% para o gráfico da Figura 9 b, aproximadamente. Atribui-se a essa diferença comparativa de 12% (em 15 anos) e 3% (em 100 anos) à utilização da geomembrana.

Vale destacar que a diferença percentual observada nas duas análises desta seção, atribui-se aos diferentes valores de coeficiente de difusão do *liner* argiloso.

ISBN: 978-65-89463-30-6

4 Conclusão

Com as simulações realizadas, buscou-se analisar como a geomembrana em conjunto aos diferentes tipos de solos podem influenciar o transporte do contaminante ao longo da geometria de estudo (barreira impermeabilizante). Assim, demonstrou-se que os solos com menores coeficientes de difusão apresentaram maior resistência à percolação do contaminante, e que, ao utilizar após estes, um geocomposto, neste caso uma geomembrana, os valores de concentração do contaminante percolados para o solo natural reduziram de forma ainda mais significativa.

Dessa forma, com vistas à preocupação ambiental e à necessidade de os projetos de Engenharia Civil implicarem em o menor impacto possível no meio ambiente, tem-se aqui o estudo de uma geometria de domínio semelhante à uma fração de um aterro sanitário, onde acondiciona-se diversos tipos de resíduos e também inúmeros tipos de contaminantes.

Assim, para que a prevenção de problemas ambientais seja mais eficiente, tem-se a necessidade de aprofundamento neste estudo, uma vez que, analisando-se estes parâmetros (e outros mais que não foram contemplados neste artigo) em conjunto, pode-se otimizar a previsão dos impactos ambientais, reduzindo-se assim o prejuízo, muita das vezes a longo prazo, com algumas medidas preventivas tomadas ainda na fase de planejamento.

Com isso, sugere-se a utilização de solos com coeficientes de difusão inferiores à ordem de 10^{-11} m²/s como barreiras impermeabilizantes, bem como a utilização conjunta de geomembranas com coeficientes de difusão inferiores à ordem de 10^{-12} m²/s conforme verifica-se nos resultados apresentados. Estas medidas em conjunto reduziram significativamente o transporte do contaminante por difusão.

Por fim, para trabalhos futuros, sugere-se o estudo conjunto desses parâmetros associados à diferentes disposições da geometria de domínio, análises de fluxo bi e/ou tridimensionais; sugere-se ainda a análise simultânea a outros mecanismos de transporte de contaminante, como por exemplo a advecção.

Agradecimentos

Os autores gostariam de expressar seus agradecimentos à Universidade Católica de Brasília pelo suporte dado durante esta pesquisa e preparação deste artigo.

Referências

ALBARÈDE, F. Geoquímica uma introdução / Francis Albarède; tradução Fábio R. Dias. São Paulo. Oficina de Textos, 2011.

BEAR, J. & CHENG, A. H.-D. (2010). Modeling Groundwater Flow and Contaminant Transport, Vol. 23, Springer, New York, NY, USA, p. 834.

BOSCOV, M. E. G. Geotecnia ambiental. Ed. Oficina de Textos. São Paulo. 2008.

JESUS, S. R. C. B. P. de; CAVALCANTE, A. L. B. Estudo de Modelos Numéricos para Descrição do Fenômeno de Advecção. VI Simpósio Brasileiro de Aplicações de Informática em Geotecnia (INFOGEO). Editora Ipanema Ltda., 2011. p. 21 – 30.

QUEIROZ, I. A., JESUS, S. R. C. B. P. de. Estudo de Difusão em Transporte de Contaminantes Usando o Método dos Elementos Finitos. V Simpósio de Prática de Engenharia Geotécnica na Região Centro Oeste (GEOCENTRO). Associação Brasileira de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica (ABMS). 2019. p. 485 – 492.

ROWE, R. K., HRAPOVIC, L. & KOSARIC, N. (1995). Diffusion of Chloride and Dichloromethane Through an HPDE Geomembrane. Geosynthetics International, Vol. 2, No. 3, pp. 507-536.