XXII Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica
XI Simpósio Brasileiro de Engenheiros Geotécnicos Jovens
24 a 28 de agosto de 2026 – Brasília/DF
DOI: 10.47094/COBRAMSEG2026.6/84

Efeito do licor negro kraft e cimento CP II-F-32 na condutividade hidráulica de um solo argiloso compactado

Bruno Pereira de Queiroz
Doutorando, Universidade Federal de Viçosa (UFV), Viçosa, Brasil, bruno.queiroz@ufv.br

Rejane Nascentes
Professora, Universidade Federal de Viçosa (UFV), Viçosa, Brasil, rejane.nascentes@ufv.br

Maria Luiza Nobre de Almeida
Aluna de graduação, Universidade Federal de Viçosa (UFV), Viçosa, Brasil, maria.luiza.almeida@ufv.br

Felipe Tura
Aluno de graduação, Universidade Federal de Viçosa (UFV), Viçosa, Brasil, felipe.tura@ufv.br

Roberto Lopes Ferraz
Professor, Universidade Federal de Viçosa (UFV), Viçosa, Brasil, rlferraz@ufv.br

RESUMO: Solos compactados são amplamente empregados como barreiras hidráulicas em sistemas de disposição de resíduos, contudo podem apresentar variação da condutividade hidráulica durante a percolação de água ou lixiviados. Este estudo avaliou a evolução da condutividade hidráulica (k_{20}) de um solo argiloso compactado estabilizado com licor negro kraft e cimento CP II-F-32 ao longo de ensaios de permeabilidade de longa duração. As misturas foram preparadas com licor negro incorporado à água de compactação (100 e 200 mgNa/kg de solo seco), com e sem adição de 2% de cimento. As colunas de solo foram moldadas no ramo úmido da curva de compactação, com grau de compactação de 95%, e submetidos a percolação por aproximadamente 300 dias. Os resultados mostraram que a adição de licor reduziu a condutividade hidráulica e as amplitudes de variação de k_{20} em comparação ao solo compactado. A mistura com 200 mgNa e cimento apresentou o melhor desempenho hidráulico, com baixos valores iniciais, picos discretos e rápida estabilização. A redução de k_{20} foi associada à dispersão promovida pelo Na^+ do licor negro, que favorece a reorganização das partículas finas e o preenchimento de poros, enquanto o Ca^{2+} liberado pelo cimento tende a atenuar parcialmente esse efeito por meio de interações eletroquímicas na estrutura do solo.

PALAVRAS-CHAVE: Licor negro kraft, Condutividade hidráulica, Estabilização química de solo, Compactação, Barreiras de baixa permeabilidade.

ABSTRACT: Compacted soils are widely used as hydraulic barriers in waste disposal systems; however, their hydraulic conductivity may vary during the percolation of water or leachates. This study evaluated the evolution of hydraulic conductivity (k_{20}) in a compacted clayey soil stabilized with kraft black liquor and CP II-F-32 cement during long-term permeability tests. The mixtures were prepared with black liquor incorporated into the compaction water (100 and 200 mgNa/kg of dry soil), with and without the addition of 2% cement. Soil columns were compacted on the wet side of the compaction curve at a degree of compaction of 95% and subjected to percolation for approximately 300 days. The results showed that the addition of black liquor reduced hydraulic conductivity and the amplitude of k_{20} variations compared with the compacted soil. The mixture containing 200 mgNa and cement exhibited the best hydraulic performance, with low initial values, discrete peaks, and rapid stabilization. The reduction in k_{20} was associated with dispersion promoted by Na^+ from the black liquor, which favors the rearrangement of fine particles and pore filling, while Ca^{2+} released by the cement partially attenuates this effect through electrochemical interactions within the soil structure.

KEYWORDS: Kraft black liquor, Unconfined compressive strength, Chemical soil stabilization, Compaction, Barrier materials.

1 INTRODUÇÃO

Aterros sanitários permanecem como uma das principais soluções de engenharia para a disposição ambientalmente segura de resíduos sólidos urbanos (RSU), devido ao custo relativamente baixo e à elevada capacidade de armazenamento (Khodary et al., 2018). Nesses sistemas, camadas de argila compactada são amplamente utilizadas como barreiras hidráulicas para reduzir a migração de contaminantes para o solo e para as águas subterrâneas (Musso et al., 2010). Entretanto, o custo elevado de materiais sintéticos frequentemente limita sua aplicação, especialmente em municípios de pequeno e médio porte, incentivando o uso de solos compactados e o desenvolvimento de técnicas de estabilização com materiais alternativos. Entre esses materiais, o licor negro kraft, subproduto alcalino da indústria de celulose rico em compostos de sódio, apresenta potencial para modificar a estrutura de solos argilosos por meio da interação de cátions Na^+ com as partículas de argila (Queiroz et al., 2025).

No contexto dessas soluções baseadas em solos compactados e misturas estabilizadas quimicamente, a estabilidade hidráulica a longo prazo de barreiras utilizadas em aterros sanitários é um aspecto fundamental, uma vez que processos geoquímicos e interações com o fluido percolante podem alterar a estrutura do solo e, consequentemente, sua condutividade hidráulica. Dessa forma, a avaliação experimental do comportamento dessas barreiras ao longo de períodos prolongados de percolação é essencial para compreender sua sustentabilidade e seu desempenho em condições reais de campo.

Este estudo investigou o efeito combinado do licor negro kraft de madeira de pinus e cimento CP II-F-32 na condutividade hidráulica de um solo argiloso compactado em sua estabilidade hidráulica a longo prazo. Ensaios de colunas foram conduzidos por aproximadamente 300 dias, fornecendo uma indicação do desempenho hidráulico dessas misturas em condições prolongadas. Os resultados obtidos sugerem que as misturas avaliadas apresentam potencial para manter valores adequados de condutividade hidráulica ao longo do tempo, sugerindo sua viabilidade para aplicação em sistemas de revestimento de aterros. Destaca-se que o experimento permanece em andamento, possibilitando a avaliação do comportamento hidráulico das misturas em períodos ainda mais longos.

2 MATERIAIS E MÉTODOS

2.1 Solo, estabilizantes químicos e misturas

O solo analisado neste estudo é um solo residual maduro derivado de gnaisse, classificado pedologicamente como Latossolo Vermelho-Amarelo (horizonte B). As amostras deformadas foram coletadas no campus da Universidade Federal de Viçosa (UFV), estado de Minas Gerais, Brasil, em um talude de corte localizado nas coordenadas geográficas 20º45'08.7" S e 42º51'30.4" W.

Os estabilizantes químicos empregados foram o licor negro kraft de madeira de pinus e o cimento Portland composto com fíler calcário (CP II-F-32). O licor negro, proveniente de estudos realizados no Laboratório de Química da Madeira (LAQUIM) da Universidade Federal de Santa Maria (RS), teve sua composição química determinada por espectrofotometria de absorção atômica (Agilent Technologies, modelo 240FS), conforme apresentado na Tabela 1.

Tabela 1. Caracterização química do licor negro Kraft

[Na]	[K]	[Mg]	[Ca]	[Mn]	[Fe]	[Cu]	[Zn]	[Al]	[Si]	ρ	pH
mg/L										g/cm³	
19724	153	5,3	12	12	13	0,43	0,68	39	42	1,062	13,48

[Na], [K], [Mg], [Ca], [Mn], [Fe], [Cu], [Zn], [Al], [Si] – Concentração de sódio, potássio, magnésio, cálcio, manganês, ferro, cobre, zinco, alumínio e silício; ρ – massa específica.

O cimento CP II-F-32 foi selecionado por sua disponibilidade comercial e pelo potencial influência na resistência à compressão não confinada das misturas de solo. Sua caracterização química, apresentada na Tabela 2, foi realizada por fluorescência de raios X (FRX), utilizando um espectrômetro Rigaku Primus II, com amostras preparadas na forma de pastilhas fundidas. O teor de óxido de cálcio livre foi determinado pelo método do etilenoglicol, conforme a norma NBR 17086-10 (ABNT, 2023).

Tabela 2. Caracterização química do cimento CP II-F-32

H_2O	PF	MgO	Al_2O_3	SiO_2	P_2O_5	SO_3	Cl	K_2O	CaO	MnO	Fe_2O_3	SrO	CaO-l
% em massa													
2,82	15,60	1,31	4,15	15,10	0,34	0,74	0,10	0,83	55,20	0,21	2,07	0,30	0,18

PF – perda ao fogo; CaO-l – óxido de cálcio livre.

Foram produzidas quatro misturas: solo com adições de licor negro correspondentes a 100 e 200 mgNa/kg de solo seco, equivalentes a aproximadamente 0,5% e 1,1% em massa de licor, respectivamente, em relação à massa seca do solo; e solo com as mesmas dosagens de licor negro kraft combinadas com 2% de cimento CP II-F-32, também referido à massa seca do solo.

2.2 Caracterização geotécnica e ensaios de compactação

A caracterização geotécnica do solo seguiu recomendações da ABNT, incluindo a determinação da massa específica dos sólidos (ABNT, 2025a), determinação dos limites de liquidez e plasticidade (ABNT, 2025b; 2025c), análise granulométrica (ABNT, 2025d), e ensaios de compressão não confinada, realizados tanto no solo quanto nas misturas. A compactação do solo e das misturas foi conduzida conforme as normas brasileiras para compactação de solos (ABNT, 2025e) e de misturas solo-cimento (ABNT, 2012), utilizando energia padrão Proctor.

Para o preparo das misturas, o licor negro foi adicionado por inclusão na água de compactação. As amostras foram mantidas em cura por 24 horas, posteriormente passadas em peneira com abertura de 4,75 mm para destorroamento e, em seguida, submetidas ao ensaio de compactação. O período de cura teve como objetivo uniformizar o teor de umidade e favorecer as reações de troca catiônica entre o solo e o licor negro, responsáveis por alterar a densidade de carga elétrica na superfície das partículas de argila e promover sua dispersão.

O preparo das misturas solo-licor-cimento seguiu procedimento semelhante. Após a adição do licor negro e o período de cura de 24 horas, o cimento foi incorporado. Um intervalo adicional de aproximadamente uma hora foi respeitado antes da compactação, para permitir o início do processo de pega do cimento. Em seguida, as amostras foram passadas novamente na peneira de 4,75 mm e submetidas à compactação. O tempo total entre a finalização da mistura e a compactação final dos corpos de prova não excedeu uma hora e meia, garantindo que o cimento permanecesse em condições adequadas de pega durante o processo.

2.3 Ensaios de coluna

Os ensaios de percolação foram conduzidos em equipamento desenvolvido por Caneschi (2012). A descrição detalhada da concepção, montagem e funcionamento do sistema encontra-se em Queiroz et al. (2025). Adotou-se gradiente hidráulico igual a 10, conforme recomendações da norma americana ASTM D5856-95, considerando-se os valores de condutividade hidráulica previamente determinados para o solo natural e para as misturas solo-licor.

Os ensaios em coluna foram realizados com água deionizada, sob temperatura controlada. A temperatura ambiente manteve-se predominantemente entre 19,8 e 23,2 °C (percentis 5 e 95), com média de 21,3 °C. Os valores de condutividade hidráulica foram corrigidos para 20 °C (k_{20}). A condutividade hidráulica do solo compactado e das quatro misturas de solo-licor e solo-licor-cimento foi determinada em triplicata, totalizando 15 colunas de solo. Os ensaios foram conduzidos por aproximadamente 300 dias de monitoramento contínuo, correspondentes ao período analisado neste estudo, permanecendo o experimento em operação.

As colunas de solo foram compactadas no ramo úmido da curva de compactação, com desvios de umidade entre 0,5% e 1,0% em relação ao teor ótimo e grau de compactação de 95%, definidos pela energia Proctor normal. A moldagem foi realizada, sob energia estática, visando garantir homogeneidade e reprodutibilidade, sendo executada diretamente no interior de moldes rígidos de PVC, com 10 cm de diâmetro interno, 12 cm de altura e 6 mm de espessura de parede.

Cada molde possuía dois sulcos transversais internos, localizados a 4 cm das extremidades superior e inferior, os quais foram preenchidos com bentonita antes da compactação, com o objetivo de mitigar a

ocorrência de fluxo preferencial na interface solo-molde. Todos as colunas de solo compactadas foram submetidas à cura por 7 dias em câmara úmida.

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1 Caracterização geotécnica

A caracterização geotécnica e a classificação do solo, segundo o Sistema Unificado de Classificação de Solos (USCS), são apresentadas na Tabela 3. O solo é predominantemente argiloso e classificado como argila de alta plasticidade (CH). A distribuição granulométrica, também apresentada na Tabela 3, segue as recomendações da norma NBR 6502 (ABNT, 2022).

Tabela 3. Caracterização geotécnica e classificação do solo.

ρ_s	Análise granulométrica (%)				Limites de Atterberg (%)			USCS
(g/cm³)	Argila	Silte	Areia	Pedregulho	w_L	w_P	*IP*	
2,776	65,0	10,8	24,0	0,2	91	31	60	CH

ρ_s – massa específica dos sólidos; w_L – limite de liquidez; w_P – limite de plasticidade; *IP* – índice de plasticidade; USCS – *Unified Soil Classification System*; CH – argila inorgânica de alta plasticidade.

3.1 Ensaios de compactação

As curvas de compactação do solo e das misturas com adições de licor negro kraft correspondentes a 100 e 200 mg Na/kg de solo seco, assim como das misturas combinadas dessas mesmas dosagens de licor negro com 2% de cimento CP II-F-32, são apresentadas na Figura 1. Os parâmetros ótimos de compactação teor de umidade ótimo ($w_{ót}$), massa específica seca máxima ($\rho_{d,máx}$) e índice de vazios mínimo ($e_{mín}$), bem como o coeficiente de determinação (R^2) e as equações quadráticas ajustadas às curvas de compactação, estão listados na Tabela 4. As curvas de compactação foram ajustadas por regressão polinomial de segundo grau, na forma: $\rho_d = a \cdot w^2 + b \cdot w + c$ em que ρ_d é a massa específica seca e w é o teor de umidade do solo.

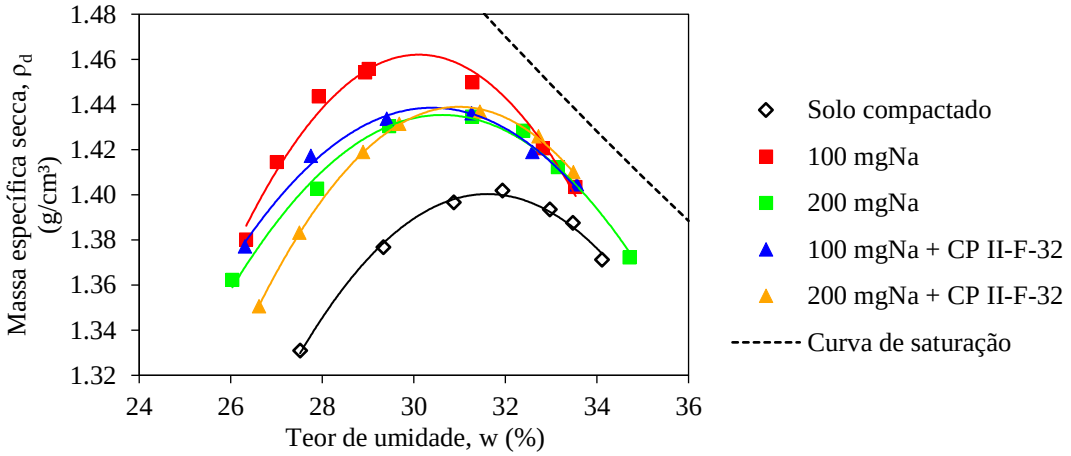


Figura 1. Curvas de compactação do solo e das misturas solo-licor e solo-licor-cimento

Tabela 4. Parâmetros ótimos de compactação do solo e das misturas solo-licor e solo-licor-cimento

Mistura	$w_{ót}$ (%)	$\rho_{d,máx}$ (g/cm³)	e_{min}	Equação de regressão quadrática ($\rho_d = a \cdot w^2 + b \cdot w + c$)	R^2 (%)
Solo compactado	31,6	1,400	0,982	ρ_d = - 0,0042w^2 + 0,2662w - 2,8065	99,3
100 mgNa	30,1	1,462	0,899	ρ_d = - 0,0053w^2 + 0,3213w - 3,3746	97,3
100 mgNa + CP II-F-32	30,4	1,439	0,930	ρ_d = - 0,0036w^2 + 0,2171w - 1,8611	98,8
200 mgNa	30,6	1,435	0,934	ρ_d = - 0,0036w^2 + 0,2226w - 1,9723	98,7
200 mgNa + CP II-F-32	31,0	1,439	0,929	ρ_d = - 0,0046w^2 + 0,2862w - 2,9951	100,0

Os resultados apresentados na Figura 1 e na Tabela 4 indicam que a adição de licor negro kraft de madeira de pinus promoveu redução do teor de umidade ótima e aumento da massa específica aparente seca máxima do solo. O solo compactado apresentou $w_{ót}$ de 31,6% e $\rho_{d,máx}$ de 1,400 g/cm³. Com a adição de 100 mgNa de licor negro, observou-se deslocamento da curva de compactação, com redução do teor de umidade ótima para 30,1% e aumento da massa específica seca máxima para 1,462 g/cm³. Para a dosagem de 200 mgNa, os parâmetros ótimos foram 30,6% e 1,435 g/cm³, respectivamente, permanecendo superior ao do solo compactado, porém com incremento na $\rho_{d,máx}$ menos expressivo. Esse comportamento indica que ganhos adicionais de compactação tendem a ser limitados em dosagens mais elevadas de licor.

O incremento da massa específica seca máxima pode ser atribuído às interações químicas entre o licor negro e a fração argila do solo. A dissociação dos sais de sódio presentes no licor aumenta a disponibilidade de Na^+ na solução intersticial, favorecendo reações de troca catiônica e modificando o arranjo das partículas finas. Esse processo tende a promover maior dispersão das partículas de argila e rearranjos microestruturais durante a compactação, contribuindo para o deslocamento da curva de compactação observado nas misturas com licor (Queiroz et al., 2025). Adicionalmente, a elevação do pH imposta pelo caráter alcalino do licor amplia a carga negativa superficial da caulinita, reforçando os mecanismos de repulsão eletrostática descritos por Chorom e Rengasamy (1995).

A adição de 2% de cimento CP II-F-32 resultou em discreto aumento do teor de umidade ótima, associado ao consumo de água durante as reações iniciais de hidratação. A massa específica seca máxima permaneceu próxima de 1,439 g/cm³, indicando que o Ca^{2+} liberado pelo cimento modifica parcialmente o ambiente iônico do sistema e limita os efeitos dispersivos promovidos pelo Na^+ do licor.

3.2 Ensaios de coluna

A variação do coeficiente de condutividade hidráulica corrigido para 20°C (k_{20}) em função do volume de poros percolados (vpp), ao longo de aproximadamente 300 dias de monitoramento contínuo, é apresentada na Figura 2, sendo o experimento ainda mantido em operação. Uma das colunas do solo compactado (coluna A) apresentou comportamento hidráulico distinto das demais ao longo do período de monitoramento e, por essa razão, foi excluída das análises comparativas. Assim, os resultados apresentados referem-se a 14 colunas com comportamento consistente. A figura é subdividida em painéis de A a E, organizados de modo a facilitar a comparação entre os diferentes tratamentos. Os painéis A a C mostram o comportamento do solo compactado e das misturas com 100 mgNa e 200 mgNa de licor negro kraft, respectivamente. Os painéis D e E correspondem às misturas contendo 100 mgNa e 200 mgNa de licor, associadas à adição de 2% de cimento CP II-F-32. Cada painel apresenta os resultados individuais das colunas de solo, identificados por diferentes símbolos e cores (colunas A, B e C).

Os resultados apresentados na Figura 2 evidenciam que a condutividade hidráulica (k_{20}) evoluiu de forma variável com o avanço do volume de poros percolados (vpp), apresentando fases sucessivas de aumento, estabilização e redução. Apesar desse padrão geral, diferenças marcantes foram observadas entre os tratamentos quanto à magnitude dos valores máximos, à amplitude das variações e à estabilidade hidráulica ao longo do período analisado.

O solo compactado (Figura 2.A) apresentou os maiores valores máximos de k_{20} entre todos os tratamentos avaliados, com determinações máximas obtidas da ordem de 1×10^{-7} m/s e maior volume de poros percolados quando comparado às demais misturas. Houve aumento gradual da condutividade hidráulica até cerca de 40 e 60 vpp, seguido de estabilização relativa em torno de 9×10^{-8} m/s entre 60 e 120 vpp. Posteriormente, ocorreu redução progressiva de k_{20}, atingindo aproximadamente 4×10^{-8} m/s na coluna B (245 vpp) e 3×10^{-8} m/s na coluna C (230 vpp). A amplitude de variação dos valores de k_{20} para o solo compactado foi a maior entre os tratamentos analisados, sendo da ordem de 7×10^{-8} (coluna C) a 8×10^{-8} m/s (coluna B). Nos volumes finais percolados, a coluna B apresentou valores de k_{20} que tenderam a se reaproximar dos níveis iniciais, enquanto a coluna C exibiu valores finais inferiores aos inicialmente registrados.

As colunas da mistura com 100 mgNa (Figura 2.B) exibiram comportamento homogêneo, com valores iniciais de k_{20} próximos ou ligeiramente inferiores a 1×10^{-8} m/s. Em todas as colunas de solo, os primeiros volumes percolados apresentaram aumento discreto, atingindo valores máximos de k_{20} na faixa de 2×10^{-8} a 3×10^{-8} m/s entre 20 e 30 vpp. Após esse estágio, ocorreu redução suave ou estabilização em faixas estreitas de condutividade hidráulica, com valores finais entre 1×10^{-8} e 2×10^{-8} m/s. A amplitude de variação dos valores

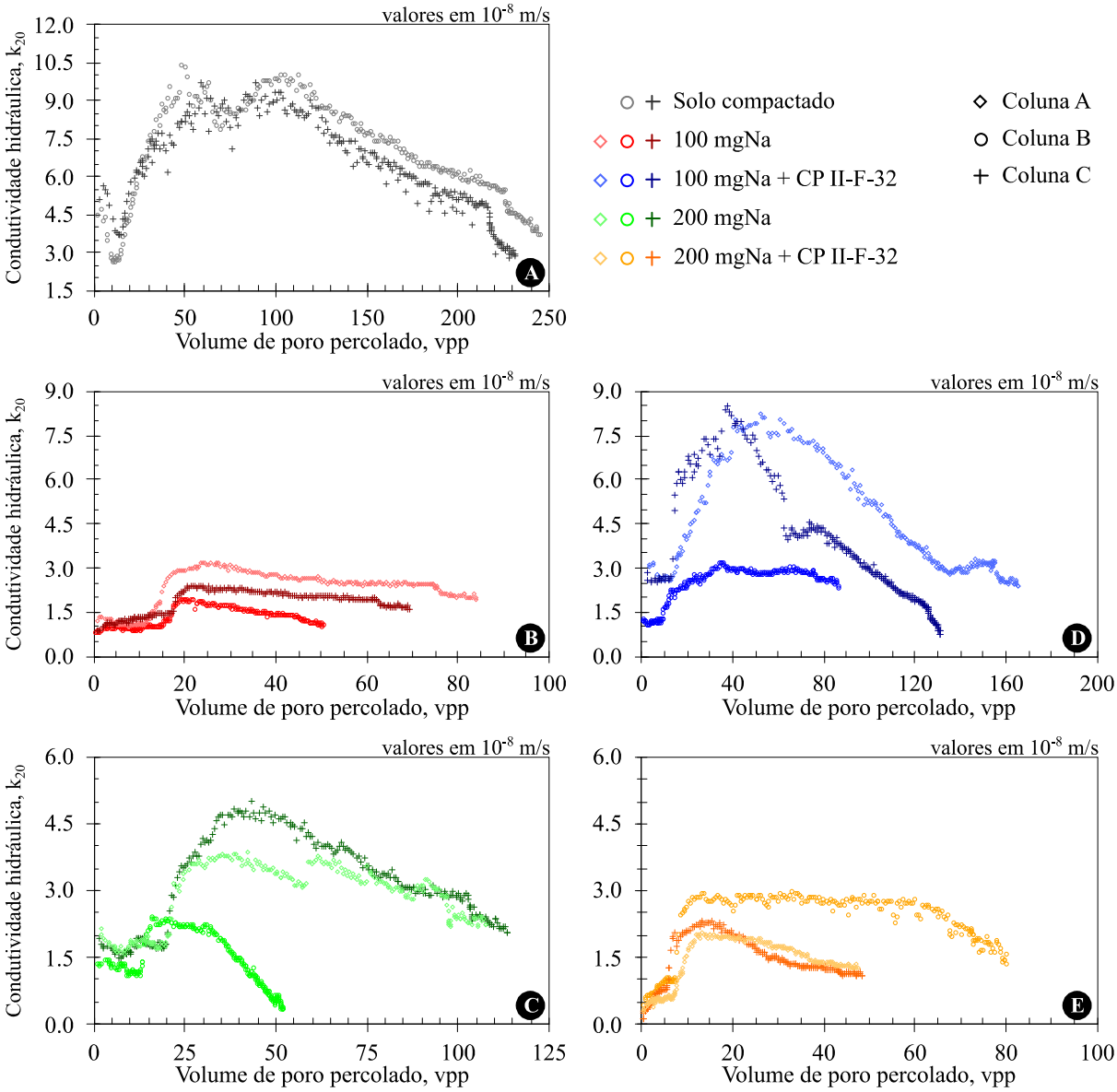


Figura 2. Variação do coeficiente de condutividade hidráulica corrigido para 20 °C (k_{20}) em função do volume de poros percolados (vpp) para o solo natural e para as misturas solo-licor e solo-licor-cimento, ao longo de aproximadamente 300 dias de percolação.

de k_{20} foi limitada a 2×10^{-8} m/s, refletindo baixa dispersão entre as colunas deste tratamento.

A mistura com 200 mgNa (Figura 2.C) exibiu comportamento mais heterogêneo entre as colunas quando comparado à dosagem de 100 mgNa. Os valores iniciais de k_{20} situaram-se entre $1{,}5\times10^{-8}$ (repetição A) e $1{,}8\times10^{-8}$ m/s (repetição C) até 20 vpp, seguidos de aumento gradual até $3{,}7\times10^{-8}$ e $4{,}7\times10^{-8}$ m/s, respectivamente nas colunas A e C, entre 25 e 50 vpp. Após os máximos, a condutividade hidráulica reduziu-se progressivamente, com tendência de convergência para valores próximos de 2×10^{-8} m/s nessas colunas. A coluna B apresentou padrão distinto, com redução inicial da condutividade hidráulica até aproximadamente 1×10^{-8} m/s, aumento transitório para $2{,}2\times10^{-8}$ m/s entre 15 e 30 vpp e posteriormente decréscimo acentuado, atingindo valores mínimos de $3{,}7\times10^{-9}$ m/s, inferiores aos valores iniciais ($1{,}2\times10^{-8}$ m/s). A amplitude de variação dos valores de k_{20}, entre 2×10^{-8} e 4×10^{-8} m/s, evidencia maior dispersão entre as colunas em relação à mistura com 100 mgNa.

A mistura com 100 mgNa e cimento CP II-F-32 (Figura 2.D) exibiu comportamento relativamente heterogêneo entre as colunas, com dois corpos de prova apresentando padrão semelhante e um comportamento distinto. Os valores iniciais de k_{20} situaram-se entre aproximadamente $1{,}2\times10^{-8}$ m/s (coluna B) e $3{,}0\times10^{-8}$ m/s

(colunas A e C), com elevação já a partir de 10 a 15 vpp, atingindo máximos de 3×10^{-8} (coluna B) e 8×10^{-8} m/s (colunas A e C) entre 40 e 50 vpp, inferiores aos picos observados para o solo compactado. As colunas A e C apresentaram trajetória semelhante, caracterizada por aumento até valores próximos de 8×10^{-8} m/s, seguido de redução progressiva ao longo da percolação. Na coluna C, após o pico em torno de 35 vpp, observou-se decréscimo gradual para aproximadamente 6×10^{-8} m/s entre 40 e 60 vpp, seguido de queda mais acentuada para cerca de 4×10^{-8} m/s e posterior redução contínua até valores da ordem de 7×10^{-9} m/s ao final do ensaio. Em contraste, a coluna B apresentou padrão distinto, com valor máximo de k_{20} da ordem de 3×10^{-8} m/s, estabilização entre 30 e 70 vpp e subsequente redução gradual para valores próximos de $2{,}5\times10^{-8}$ m/s. A amplitude de variação dos valores de k_{20}, atingindo cerca de 6×10^{-8} m/s na coluna A e 8×10^{-8} m/s na coluna C, e aproximadamente de 2×10^{-8} m/s na coluna B, evidencia maior dispersão entre as colunas, observando-se, contudo, tendência consistente de redução da condutividade hidráulica para volumes percolados superiores a 100-120 vpp.

A mistura com 200 mgNa e cimento CP II-F-32 (Figura 2.E) apresentou comportamento relativamente uniforme entre as colunas, caracterizado por valores iniciais muito baixos de condutividade hidráulica, variando entre aproximadamente 3×10^{-9} e 5×10^{-9} m/s nos primeiros volumes percolados. Em todas as colunas de solo, houve aumentos graduais de k_{20} nos primeiros volumes de poros percolados até 5-7 vpp, seguidos de incrementos abruptos que conduziram a picos entre cerca de 2×10^{-8} e 3×10^{-8} m/s, atingidos ainda nos estágios iniciais da percolação, entre 10 e 15 vpp. Após esses máximos, ocorreu tendência predominante de redução gradual, conduzindo à convergência para valores relativamente estáveis, situados na faixa de $1{,}0\text{-}1{,}5\times10^{-8}$ m/s. As amplitudes de variação permaneceram moderadas, da ordem de $1{,}8\times10^{-8}$ a $2{,}5\times10^{-8}$ m/s, inferiores às observadas em outros tratamentos e semelhantes àquelas da mistura com 100 mgNa, indicando picos discretos e maior estabilidade da condutividade hidráulica ao longo da percolação. De modo geral, o comportamento foi marcado por máximos precoces, amplitudes reduzidas e volumes máximos de poros percolados moderados, sem oscilações tardias expressivas.

A análise comparativa dos tratamentos indica que o desempenho hidráulico deve ser interpretado considerando não apenas os valores mínimos de k_{20}, mas também a magnitude dos máximos, a amplitude das variações e a estabilidade a longo prazo. Embora algumas colunas tenham apresentado valores finais de k_{20} semelhantes ou até inferiores aos iniciais, tais reduções ocorreram apenas após a percolação de grandes volumes de poros. A mistura com 200 mgNa e cimento CP II-F-32 apresentou o melhor desempenho global, combinando valores iniciais reduzidos de k_{20}, máximos discretos obtidos ainda nos primeiros volumes de poros e amplitudes moderadas, com convergência relativamente rápida para valores estáveis. Em seguida, a mistura com 100 mgNa destacou-se por apresentar máximos e amplitudes semelhantes, porém atingidos em volumes de poros ligeiramente superiores. A mistura com 200 mgNa apresentou desempenho intermediário, com amplitude inferior e retorno mais precoce aos valores iniciais de k_{20} quando comparada à mistura com 100 mgNa e cimento CP II-F-32, que exibiu maior amplitude de variação e convergência mais tardia. Por fim, o solo compactado apresentou o comportamento menos favorável, com os maiores valores máximos de k_{20}, as maiores amplitudes de variação e o maior volume de poros necessário para reaproximação dos valores iniciais.

Os resultados obtidos neste estudo são consistentes com aqueles reportados por Queiroz et al. (2025) para o mesmo solo estabilizado com licor negro kraft. Naquele trabalho, a adição de licor promoveu redução da condutividade hidráulica de até uma ordem de magnitude em relação ao solo compactado, sendo os menores valores médios de k_{20} observados nas misturas contendo 3% de licor e 5% de licor associado ao cimento CP II-F-32, cujos valores permaneceram praticamente constantes ao longo da percolação. Considerando a equivalência aproximada entre as dosagens utilizadas, sendo 100 mgNa e 200 mgNa aproximadamente equivalentes a 3% e 5% de licor, respectivamente, observa-se que o ranking de desempenho hidráulico entre os tratamentos foi mantido entre os dois estudos. Esse resultado é particularmente relevante, pois indica que as diferenças nas condições de compactação não alteraram a hierarquia de desempenho das misturas: enquanto Queiroz et al. (2025) conduziram os ensaios na umidade ótima e com GC de 100%, o presente estudo adotou moldagem no ramo úmido e GC de 95%. Além disso, embora ambos os estudos tenham sido conduzidos por aproximadamente 300 dias, o menor grau de compactação empregado neste trabalho permitiu a percolação de volumes de poros substancialmente maiores do que os alcançados por Queiroz et al. (2025), que não ultrapassaram aproximadamente 7 vpp ao longo de todo o período experimental. Essa condição ampliou a faixa de avaliação da estabilidade hidráulica das misturas, permitindo acompanhar a evolução da condutividade hidráulica ao longo de intervalos mais extensos de percolação.

4 CONCLUSÃO

A estabilização combinada de licor negro kraft e cimento CP II-F-32 reduziu a condutividade hidráulica do solo e aumentou a estabilidade hidráulica das misturas ao longo prazo. As misturas solo-licor e solo-licor-cimento apresentaram menores valores de k_{20} e menores amplitudes de variação em comparação ao solo compactado. Entre as misturas avaliadas, a misturas com 200 mgNa e cimento CP II-F-32 apresentou o melhor desempenho hidráulico, com valores iniciais de k_{20} menores, picos discretos e rápida estabilização. A mistura com 100 mgNa apresentou comportamento semelhante, porém com estabilização ligeiramente tardia. O desempenho foi consistente com estudos anteriores para o mesmo solo, mesmo sob diferentes parâmetros de compactação e com maior volume de poros percolados ao longo de aproximadamente 300 dias de ensaio.

AGRADECIMENTOS

Este trabalho foi financiado pela Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES). Os autores agradecem ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) e à Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de Minas Gerais (FAPEMIG) pelo apoio ao grupo de pesquisa.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Associação Brasileira de Normas Técnicas (2012). NBR 12023. *Solo-cimento – Método de ensaio de compactação*. Rio de Janeiro.

Associação Brasileira de Normas Técnicas (2022). NBR 7182. *Solos e rochas – Terminologia*. Rio de Janeiro.

Associação Brasileira de Normas Técnicas (2023). NBR 17086-10. *Cimento Portland – Análise química*: Parte 10: Determinação de óxido de cálcio livre por etilenoglicol. Rio de Janeiro.

Associação Brasileira de Normas Técnicas (2025a). NBR 17212. *Solos – Determinação da massa específica dos sólidos da fração passante na peneira com abertura de 2,0 mm*. Rio de Janeiro.

Associação Brasileira de Normas Técnicas (2025b). NBR 6459. *Solos – Determinação do limite de liquidez*. Rio de Janeiro.

Associação Brasileira de Normas Técnicas (2025c). NBR 7180. *Solos – Determinação do limite de plasticidade*. Rio de Janeiro.

Associação Brasileira de Normas Técnicas (2025d). NBR 7181. *Solos – Análise granulométrica*. Rio de Janeiro.

Associação Brasileira de Normas Técnicas (2025e). NBR 7182. *Solos – Ensaio de compactação*. Rio de Janeiro.

ASTM International (2002). ASTM D5856-95: *Standard Test Method for Measurement of Hydraulic Conductivity of Porous Material Using a Rigid-Wall, Compaction-Mold Permeameter*.

Caneschi, F. P. (2012) *Estudos geoambientais em solos modificados quimicamente*. Tese de Doutorado, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Departamento de Engenharia Civil, Universidade Federal de Viçosa, 136 f.

Chorom, M., Rengasamy, P. (1995) Dispersion and zeta potential of pure clays as related to net particle charge under varying pH, electrolyte concentration and cation type. *European Journal of Soil Science*, 46(4):657-665.

Khodary SM, Negm AM, Tawfik A (2018) Geotechnical properties of the soils contaminated with oils, landfill leachate, and fertilizers. Arabian Journal of Geosciences. 11(2), 1-17.

Musso TB, Roehl KE, Pettinari G, Vallés JM (2010) Assessment of smectite-rich claystones from Northpatagonia for their use as liner materials in landfills. Applied Clay Science. 48(3), 438-445.

Queiroz, B. P. et al. (2025) Hydraulic conductivity of compressible clayey soil stabilized with kraft black liquor and composite cement. *Environmental Earth Sciences*, 84, 47.