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/COBRAMSEG2026.6/102

Influência do licor negro kraft e do cimento CP II-F-32 na resistência à compressão 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

Yuri Marques Portella
Aluno de graduação, Universidade Federal de Viçosa (UFV), Viçosa, Brasil, yuri.portella@ufv.br

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

RESUMO: Solos compactados são amplamente empregados como barreiras em sistemas de disposição de resíduos, porém podem apresentar limitações mecânicas sob variações de umidade e carregamento. Este estudo avaliou o efeito da adição de licor negro kraft e cimento CP II-F-32 na resistência à compressão não confinada de um solo argiloso compactado, considerando diferentes condições de moldagem e cura. As misturas foram preparadas com licor negro na água de compactação (100 e 200 mgNa/kg de solo seco), com e sem 2% de cimento, e moldadas com graus de compactação entre 95 e 100%. Os corpos de prova foram curados por 7 e 28 dias. Os resultados indicaram aumento significativo da resistência com a adição do licor, sobretudo para 100 mgNa e quando associado ao cimento. No ramo seco e grau de compactação de 100%, a mistura com 100 mgNa atingiu 498 e 598 kPa aos 7 e 28 dias, respectivamente, enquanto a combinação licor-cimento alcançou 553 e 692 kPa. A redução do grau de compactação resultou em decréscimos proporcionais de resistência, embora as misturas mantivessem desempenho superior ao solo. O ganho mecânico foi associado ao aumento da massa específica seca máxima e à redução da umidade ótima, relacionados à dispersão promovida pelo Na^+ e à reorganização microestrutural, parcialmente atenuada pelo Ca^{2+} do cimento. A resposta mecânica mostrou dependência direta da umidade de moldagem e do grau de compactação.

PALAVRAS-CHAVE: Licor negro kraft, Resistência à compressão não confinada, Estabilização química de solo, Compactação, Materiais de barreira.

ABSTRACT: Compacted soils are widely used as barriers in waste disposal systems. However, their mechanical performance may be affected by variations in moisture and loading conditions. This study evaluated the effect of adding kraft black liquor and CP II-F-32 cement on the unconfined compressive strength of a compacted clayey soil, considering different molding and curing conditions. The mixtures were prepared by incorporating black liquor into the compaction water (100 and 200 mgNa/kg of dry soil), with and without 2% cement, and molded at degrees of compaction ranging from 95% to 100%. Specimens were cured for 7 and 28 days. The results showed a significant increase in strength with the addition of black liquor, particularly at 100 mgNa and when combined with cement. In the dry side of the compaction curve at 100% degree of compaction, the mixture containing 100 mgNa reached 498 and 598 kPa at 7 and 28 days, respectively, whereas the black liquor-cement combination achieved 553 and 692 kPa. Reductions in the degree of compaction led to proportional decreases in strength, although the mixtures consistently outperformed the compacted soil. The mechanical improvement was associated with increases in maximum dry unit weight and reductions in optimum moisture content, related to Na^+ induced clay dispersion and microstructural rearrangement, partially mitigated by Ca^{2+} from cement. Mechanical response showed direct dependence on molding moisture and degree of compaction.

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

1 INTRODUÇÃO

Barreiras de solo compactado são amplamente utilizadas em sistemas de contenção de resíduos, como camadas de base em aterros sanitários, devido à sua capacidade de reduzir a infiltração de água e limitar a migração de contaminantes para o solo e para as águas subterrâneas (Musso et al., 2010). O desempenho dessas barreiras depende diretamente das propriedades hidráulicas e mecânicas do solo utilizado, que devem garantir a integridade e a durabilidade do sistema de contenção ao longo do tempo. Quando o solo disponível não atende a esses requisitos, técnicas de estabilização podem ser empregadas para melhorar seu comportamento. Entre as técnicas disponíveis, a estabilização química tem sido amplamente utilizada para modificar o comportamento do solo, baseando-se na interação entre aditivos e os minerais presentes, sendo capaz de alterar propriedades como resistência, permeabilidade e durabilidade (Kumar et al., 2018; Barman; Dash, 2022).

Compostos alcalinos contendo sódio têm demonstrado potencial para alterar a estrutura de solos argilosos. A dissociação de NaOH em solução libera íons Na^+ e OH^- que podem interagir com a sílica e a alumina presentes no solo e promover mudanças em suas propriedades físicas e mecânicas (Kumar et al., 2018). Entre os materiais que contêm compostos alcalinos de sódio, destaca-se o licor negro kraft, um subproduto alcalino gerado na indústria de celulose com potencial de aplicação em misturas solo-estabilizante. O licor negro kraft contém compostos inorgânicos, incluindo hidróxido de sódio (NaOH), sulfeto de sódio (Na_2S), carbonato de sódio (Na_2CO_3), sulfato de sódio (Na_2SO_4), tiossulfato de sódio ($Na_2S_2O_3$) e cloreto de sódio (NaCl) (Gustafsson et al., 2011), capazes de se dissociar em solução e liberar Na^+, o qual pode interagir com partículas de argila e pode modificar o arranjo estrutural do solo (Queiroz et al., 2025). A presença de soda residual e o caráter fortemente alcalino do licor negro kraft podem, portanto, promover efeitos semelhantes aos observados em soluções contendo NaOH, contribuindo para alterações na estrutura e no comportamento mecânico de solos argilosos.

Estudos recentes também têm investigado o uso de misturas solo-licor negro em sistemas de barreiras de baixa permeabilidade para disposição de resíduos, com foco na avaliação da condutividade hidráulica. Resultados experimentais indicam que a adição de licor negro kraft pode reduzir a permeabilidade de solos argilosos compactados e favorecer a estabilidade hidráulica das misturas ao longo do tempo, especialmente quando associada ao cimento CP II-F-32 (Queiroz et al., 2025). Entretanto, ainda são escassos os estudos que investigam o comportamento mecânico dessas misturas, particularmente no que se refere à resistência.

Este estudo avaliou o efeito do licor negro kraft de madeira de pinus e cimento CP II-F-32 na resistência à compressão não confinada de um solo argiloso compactado, considerando diferentes condições de moldagem e tempos de cura de 7 e 28 dias, a fim de analisar o potencial dessas misturas como alternativa de estabilização.

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 compressão não confinada

Os corpos de prova foram moldados tomando como referência os parâmetros de umidade ótima ($w_{ót}$) e massa específica seca máxima ($\rho_{d,máx}$) obtidos nos ensaios de compactação. Foram adotados desvios de umidade entre -1% e +2% em relação ao valor ótimo, e graus de compactação correspondentes a 95%, 98% e 100% de $\rho_{d,máx}$. A moldagem foi realizada em cilindro Proctor, sob energia estática, de modo a garantir a homogeneidade e a reprodutibilidade dos corpos de prova.

Após a moldagem, os corpos de prova foram curados por 7 e 28 dias em câmara úmida, mantendo-se condições controladas de temperatura e umidade, a fim de favorecer os processos de hidratação e as reações de troca catiônica entre o solo, o licor negro e o cimento.

Os ensaios de compressão não confinada foram executados em prensa modelo Tritech, com capacidade de 100 kN, da Wykeham Farrance International, equipada com anel dinamométrico de 1000 kgf. A velocidade de deformação axial foi mantida constante e igual a 1% por minuto, respeitando o intervalo sugerido pela NBR 12770 (ABNT, 2022) e assegurando tempo de ruptura inferior a 15 minutos.

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.

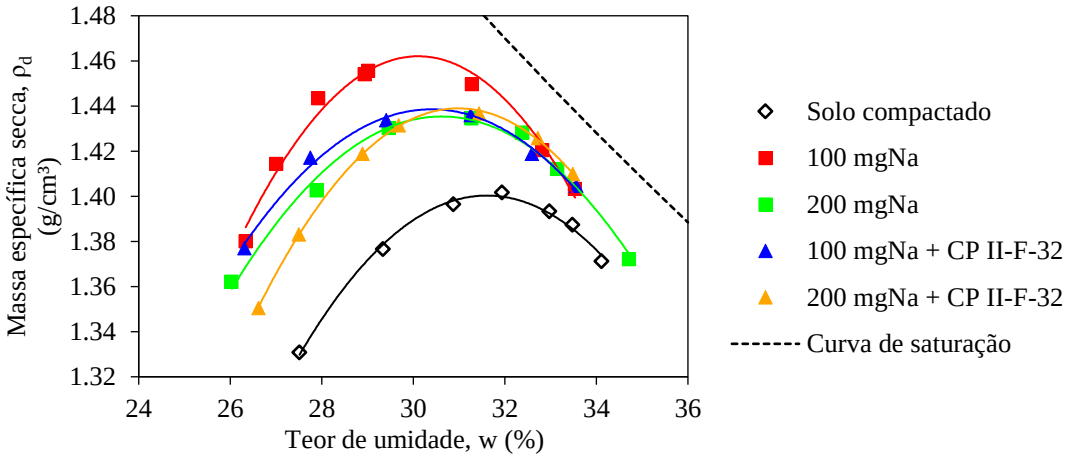


Figura 1. Curvas de compactação do solo e das misturas solo-licor e solo-licor-cimento

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 c+ 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

A análise da Figura 1 e da Tabela 4 indica 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.

Enquanto o solo apresentou $w_{ót}$ de 31,6% e $\rho_{d,máx}$ de 1,400 g/cm³, a mistura com 100 mgNa apresentou redução do teor de umidade ótima para 30,1% e aumento da massa específica seca máxima para 1,462 g/cm³. Para a concentração de 200 mgNa, observou-se teor de umidade ótima de 30,6% e massa específica aparente seca máxima de 1,435 g/cm³, ainda superior à do solo compactado, sugerindo que ganhos adicionais de compactação tendem a ser limitados em maiores concentrações de licor.

Esse comportamento pode ser atribuído às reações de troca catiônica entre o solo e o licor negro, nas quais o Na^+ liberado pela dissociação dos sais de sódio presentes no licor negro passa a dominar a solução do solo, aumentando o potencial de superfície e a espessura da dupla camada das partículas de argila, intensificando as forças repulsivas entre as partículas de argila e favorecendo a formação da estrutura dispersa (Queiroz et al., 2025). As condições alcalinas impostas pelo licor também contribuem para esse processo, ao elevar a carga negativa líquida das partículas de caulinita, favorecendo a repulsão eletrostática e a dispersão (Chorom; Rengasamy, 1995).

A incorporação de 2% de cimento CP II-F-32 às misturas contendo licor negro, proporcionou um leve aumento no teor de umidade ótima em relação às misturas correspondentes sem cimento, provavelmente associado à demanda adicional de água pelas reações de hidratação. A massa específica aparente seca máxima manteve-se em torno de 1,439 g/cm³ para as misturas com cimento CP II-F-32, sugerindo que a presença do cimento tende a contrabalançar os efeitos dispersivos promovidos pelo licor negro na estrutura do solo. O Ca^{2+} disponibilizado pelo CP II-F-32 compete com o Na^+ pelos sítios de troca, reduzindo parcialmente a expansão da dupla camada difusa e limitando incrementos significativos na massa específica seca máxima, especialmente na mistura com menor teor de licor (100 mgNa).

3.2 Ensaios de compressão não confinada

Os resultados dos ensaios de compressão não confinada realizados no solo natural e nas misturas com adições de licor negro kraft correspondentes a 100 e 200 mg Na/kg de solo seco, bem como nas misturas combinadas dessas mesmas dosagens de licor negro com 2% de cimento CP II-F-32, são apresentados na Tabela 5, para tempos de cura de 7 e 28 dias. A tabela reúne os valores médios da resistência à compressão não confinada ($\bar{q}_u$), os coeficientes de variação (CV), as deformações axiais específicas médias ($\bar{\varepsilon}$), os teores de umidade na ruptura ($\bar{w}_{rup}$) e os desvios médios de umidade em relação à umidade ótima ($\overline{\Delta w}$), considerando graus de compactação (GC) de 95%, 98% e 100% (coeficientes de variação superiores a 10% encontram-se destacados em negrito).

Os resultados apresentados na Tabela 5 indicam, de modo geral, maior resistência à compressão não confinada das misturas solo-licor e solo-licor-cimento em comparação ao solo compactado, para ambos os períodos de cura e diferentes condições de moldagem, evidenciando o efeito benéfico da adição do licor e, sobretudo, do cimento. Para fins de análise comparativa, os resultados foram avaliados conforme faixas equivalentes de desvio médio de teor de umidade em relação à umidade ótima (Δw), sendo considerados como ramo seco os corpos de prova com $\Delta w < -0{,}3$, como entorno da umidade ótima aqueles com $-0{,}3 \leq \Delta w \leq 0{,}3$, e como ramo úmido os espécimes com $\Delta w > 0{,}3$. Esse critério foi adotado de modo a permitir comparações consistentes entre o solo e as misturas sob condições semelhantes de moldagem.

Os corpos de prova de solo compactado moldados no ramo seco apresentaram os maiores ganhos de resistência ao longo do período de cura, independentemente dos parâmetros de moldagem. O solo compactado a 100% do grau de compactação no ramo seco apresentou aumento de resistência de aproximadamente 21% entre 7 e 28 dias (de 297 para 357 kPa). Entretanto, aos 7 dias, a resistência obtida no ramo seco (297 kPa) foi inferior à observada para o ramo úmido na mesma condição de compactação (324 kPa), indicando desempenho inicial mais favorável das amostras moldadas no ramo úmido.

Por sua vez, no ramo úmido (GC = 100%), verificou-se redução da ordem de 2% da resistência entre 7 e 28 dias. Esse comportamento tende a indicar estabilidade da resistência ao longo do período, uma vez que essa variação pode estar associada ao elevado coeficiente de variação registrado (11,4%), não sendo, portanto, representativa de uma perda de resistência mecânica efetiva.

Os corpos de prova com adição de 100 mgNa moldados com GC = 100% apresentaram incrementos de resistência da ordem de 68% aos 7 dias (498 kPa, ramo seco) e 67% aos 28 dias (598 kPa, umidade ótima), em relação ao solo compactado. Em contraste, a dosagem de 200 mgNa resultou em acréscimos mais modestos, da ordem de 37% aos 7 dias (365 kPa, umidade ótima) e 18% aos 28 dias (422 kPa, ramo seco). As misturas

Tabela 5. Resistência à compressão não confinada e parâmetros médios de deformação e umidade das misturas após 7 e 28 dias

Cura		7 dias					28 dias				
Mistura	GC	$\overline{\Delta w}$	$\overline{w}_{rup}$	$\bar{q}_u$	CV	$\bar{\varepsilon}$	$\overline{\Delta w}$	$\overline{w}_{rup}$	$\bar{q}_u$	CV	$\bar{\varepsilon}$
	%	%	%	kPa	%	%	%	%	kPa	%	%
Solo compactado	100	0,6	32,2	324	3,2	4,1	0,3	31,9	316	**11,4**	3,4
	100	-0,8	30,8	297	3,9	3,4	-1,1	30,5	357	3,8	3,4
	100	0,3	31,9	266	3,5	3,6	0,1	31,7	282	2,0	3,4
	98	1,1	32,8	230	4,9	3,1	0,4	32,0	268	5,7	3,7
	98	-1,0	30,7	241	2,2	2,7	-1,1	30,5	291	5,1	2,8
	98	0,1	31,7	261	6,5	3,2	0,1	31,7	279	4,6	3,0
	95	0,5	32,1	227	2,7	2,4	0,5	32,1	216	9,2	2,4
	95	-0,9	30,7	184	**15,0**	2,3	-1,0	30,7	244	3,8	2,3
100 mgNa	100	-0,9	29,2	498	1,3	3,7	-0,2	29,9	598	5,2	3,6
	98	-0,1	30,0	405	5,3	3,5	-0,6	29,5	507	2,4	3,5
	95	-0,1	30,0	318	7,0	2,6	-0,2	29,8	394	4,4	3,1
100 mgNa + CP II-F-32	100	-0,6	29,8	553	2,8	2,3	-0,9	29,5	692	2,6	2,0
	98	0,2	30,6	484	4,7	1,9	-0,6	29,8	543	5,4	1,8
	95	-0,6	29,8	370	3,5	1,8	-0,6	29,8	426	4,1	1,7
200 mgNa	100	0,5	31,1	365	5,0	4,1	-0,6	30,0	422	3,0	4,0
	98	-0,8	29,8	360	1,4	3,2	-1,3	29,3	419	3,1	3,0
	95	-1,1	29,6	319	2,9	2,5	-1,3	29,3	367	4,9	2,8
200 mgNa + CP II-F-32	100	-0,7	30,3	526	4,9	2,9	-1,7	29,3	629	4,2	2,2
	98	-0,8	30,2	432	5,2	2,4	-1,5	29,5	575	4,9	2,0
	95	-0,7	30,3	349	3,7	1,9	-0,6	30,3	477	3,4	2,0

$\bar{q}_u$ – resistência média à compressão não confinada; CV – coeficiente de variação; $\bar{\varepsilon}$ – deformação axial específica média; $\overline{w}_{rup}$ – teor médio de umidade na ruptura; $\overline{\Delta w}$ – desvio médio do teor de umidade em relação à umidade ótima.

solo-licor apresentaram aumento da resistência entre 7 e 28 dias, com destaque para a mistura com 100 mgNa, que exibiu acréscimo aproximado de 20% ao longo do período de cura. Esses resultados indicam maior eficiência mecânica da menor dosagem de Na, sugerindo que dosagens mais elevadas de licor não necessariamente conferem ganhos proporcionais de resistência.

Os corpos de prova das misturas solo-licor-cimento moldados com *GC* = 100% apresentaram os maiores incrementos de resistência em relação ao solo compactado, alcançando acréscimos da ordem de 87% aos 7 dias (553 kPa, ramo seco) e 94% aos 28 dias (692 kPa, ramo seco) para a dosagem de 100 mgNa e cimento CP II-F-32. Para a dosagem de 200 mgNa e cimento CP II-F-32, os ganhos foram semelhantes, porém inferiores, entre 76 e 78% aos 7 dias (526 kPa, ramo seco) e aos 28 dias (629 kPa, ramo seco). Observou-se ainda aumento sistemático da resistência entre 7 e 28 dias para ambas as misturas solo-licor-cimento, com destaque novamente para a dosagem de 100 mgNa e cimento CP II-F-32, que apresentou acréscimo aproximado de 25% ao longo do período de cura. Contudo, para menores graus de compactação (*GC* = 98% e 95%), verificou-se inversão dessa tendência, com as misturas contendo 200 mgNa associadas ao cimento apresentando resistências superiores às correspondentes com 100 mgNa, indicando maior dependência da dosagem mais elevada de licor em relação ao grau de compactação no desenvolvimento da resistência.

A análise comparativa dos resultados indica que a adição de licor negro kraft promoveu aumento consistente da resistência à compressão não confinada em relação ao solo compactado, efeito que se tornou mais pronunciado com a incorporação de cimento CP II-F-32. De modo geral, as misturas solo-licor-cimento apresentaram o melhor desempenho mecânico, com destaque para a dosagem de 100 mgNa associada ao cimento, que resultou nos maiores valores de resistência e nos maiores incrementos entre 7 e 28 dias de cura, especialmente para corpos de prova moldados no ramo seco e com *GC* = 100%. As misturas solo-licor também apresentaram aumento de resistência em relação ao solo compactado, sendo a dosagem de 100 mgNa superior

à de 200 mgNa, o que indica maior eficiência mecânica da menor dosagem de sódio na ausência de cimento. Por fim, o solo compactado apresentou os menores valores de resistência entre os tratamentos avaliados, embora tenha demonstrado incremento moderado ao longo do período de cura, particularmente para corpos de prova moldados no ramo seco.

Queiroz (2021), ao avaliar misturas solo-licor e solo-licor-cimento produzidas com o mesmo solo e dosagens semelhantes de Na^+ (110 e 190 mgNa/kg de solo seco), observou redução da resistência à compressão não confinada. Esse comportamento contrasta com os resultados do presente estudo e pode estar associado às diferenças na composição química do licor negro empregado. O contraste entre os resultados sugere que, além da concentração de sódio, outras características do licor, como pH e a relação Na^+/Ca^{2+}, exercem papel relevante na resposta mecânica das misturas.

Quanto às deformações específicas médias ($\bar{\varepsilon}$), constatou-se tendência de redução com a diminuição do grau de compactação para o solo compactado e as misturas solo-licor, enquanto esse comportamento se mostrou menos pronunciado nas misturas contendo cimento. De modo geral, as maiores deformações foram registradas no solo compactado, seguidas pelas misturas solo-licor, enquanto as menores ocorreram nas misturas solo-licor-cimento, evidenciando o aumento de rigidez promovido pela adição de cimento. Queiroz (2021) observou $\bar{\varepsilon}$ significativamente superiores nas misturas solo-licor em relação ao solo compactado, variando entre 9,2 a 13,3%, enquanto as misturas contendo cimento apresentaram deformações substancialmente menores. Em comparação, os valores obtidos no presente estudo indicam efeito menos pronunciado do licor sobre a deformabilidade, sugerindo diferenças na atuação do licor empregado sobre a plasticidade das misturas. Queiroz (2021) associou esse comportamento à redução do coeficiente de adensamento com o aumento da dosagem de licor, fenômeno geralmente relacionado ao incremento do limite de liquidez (Das, 2011), embora os limites de consistência não tenham sido determinados naquele estudo.

4 CONCLUSÃO

A incorporação de licor negro kraft, isoladamente ou associada ao cimento CP II-F-32, promoveu incrementos consistentes na resistência à compressão não confinada do solo compactado, com maior eficiência observada para a dosagem de 100 mgNa, especialmente quando combinada ao cimento. De modo geral, mesmo com a redução do grau de compactação, as misturas solo-licor e solo-licor-cimento mantiveram resistência superior ao solo compactado, evidenciando a contribuição do licor negro para o ganho mecânico do material. A resposta mecânica mostrou-se diretamente dependente do desvio de umidade em relação à umidade ótima e do grau de compactação, com maiores ganhos associados às amostras moldadas no ramo seco e sob maiores níveis de compactação. A adição simultânea de cimento intensificou esse comportamento, promovendo aumentos adicionais de resistência e redução das deformações específicas médias, indicando maior rigidez do material. Esses resultados sugerem que a interação entre o Na^+ proveniente do licor negro e o Ca^{2+} do cimento, aliada à reorganização microestrutural durante a compactação, desempenha papel relevante no desenvolvimento da resistência, destacando o potencial dessas misturas para aplicações em camadas de barreira e obras geotécnicas que demandem melhoria do desempenho mecânico.

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 12770. *Solo coesivo – Determinação da resistência à compressão não confinada* – Método de ensaio. 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.

Barman, D., Dash, S. K. (2022). Stabilization of expansive soils using chemical additives: A review. *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*, 14(4), 1319–1342.

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), p.657-665.

Das, B. M. (2011) *Fundamentos de Engenharia Geotécnica*. 7. ed. São Paulo: Cengage Learning, 623 p.

Gustafsson, J. et al. (2011) Pulping. In Fardim, P. (ed) *Chemical Pulping* Part 1: Fibre Chemistry and Technology (2nd ed), Vol. 6, Chapter 2. Paperi ja Puu Oy, p.187–381.

Kumar, M., Singh, J. P., Mishra, M. K. (2018) An Experimental Study of Soil Stabilisation Using Sodium Hydroxide Additive. *International Journal of Research and Innovation in Applied Science*, 3 (5), p.7–11.

Queiroz, B. P. (2021) *Efeito da estabilização combinada do licor negro kraft de madeira de pinus e cimento nas propriedades mecânicas e hidráulicas de um solo de alta compressibilidade*. Dissertação de Mestrado, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Departamento de Engenharia Civil, Universidade Federal de Viçosa, 136 p.

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.