

DOI: 10.47094/COBRAMSEG2024/93

# Uso De Geosynthetic Clay Liners Em Barragem De Rejeitos Com Inclinações Importantes

Javier Calderón, NAUE GmbH & CO Latin-America Manager Santiago, Chile [jcalderon@naue.com](mailto:jcalderon@naue.com)

Kent Von Maubeuge NAUE GmbH & CO Technical Director Espelkamp-Fiestel Germany  
[kvmaubeuge@Naue.com](mailto:kvmaubeuge@Naue.com)

**RESUMO:** Os revestimentos geossintéticos de argila GCLs são materiais compósitos fabricados industrialmente que combinam argila bentonítica e geossintéticos para aplicações de vedação. Geralmente o material se faz com argila e geotêxteis não tecidos e tecidos ou alguma combinação de geotêxteis e geomembranas. O presente trabalho apresenta um estudo de mais de 5 anos para avaliar o comportamento de cisalhamento de laboratório a longo prazo construindo vários dispositivos de cisalhamento por fluência em grande escala para avaliar o comportamento de GCLs tecidos/não tecidos perfurados com agulha sob condições in-situ simuladas de baixa carga normal e fazendo um comparativo com um estudo de campo de longa duração ao cisalhamento a longo prazo do GCL perfuradas com agulha confirmado no estudo de estabilidade de taludes da EPA de Cincinnati USA onde, entre outras GCLs foram instaladas em taludes de 1:2 (26°), com 30m de comprimento.

**PALAVRAS-CHAVE:** Barragem de rejeitos, GCL, cisalhamento.

**ABSTRACT:** GCLs clay geosynthetic liners are industrially manufactured composite materials that combine bentonite clay and geosynthetics for sealing applications. The material is generally made from clay and non-woven and woven geotextiles or some combination of geotextiles and geomembranes. The present work presents a 5+ year study to evaluate the long-term laboratory shear behaviour by constructing several large-scale creep shear devices to evaluate the behaviour of needle-punched woven/nonwoven GCLs under in-situ conditions. simulated low normal load and making a comparison with a field study of long-term shear of needle-drilled GCL confirmed in the Cincinnati USA EPA slope stability study where, among other GCLs were installed on slopes of 1 :2 (26°), 30m long.

**KEYWORDS:** Tailings dam, GCL, shear stress

## 1. INTRODUÇÃO

Os revestimentos geossintéticos de argila GCLs são materiais compósitos fabricados industrialmente que combinam argila bentonítica e geossintéticos para aplicações de vedação. O ângulo de atrito do plano médio pouco hidratado da bentonita isolada (pico aprox. 9°, residual cerca de 4° a 5°) é superado pela punção da agulha de todos os componentes, criando uma tensão de cisalhamento uniforme transmitindo ao GCL. Os GCLs são empregados em todo o mundo há quase quatro décadas incluindo Brasil já que desde vários anos atrás existe uma norma técnica aprovada pela Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT). A norma especifica os requisitos mínimos para localização, projeto, implantação e operação de aterros sanitários de diferentes portes, para a disposição final de resíduos sólidos urbanos. Os GCLs são geralmente usados para substituir ou aumentar mantos de argila compactada. A permeabilidade GCL é tipicamente na faixa de  $\leq 5 \times 10^{-11}$  m/s. Uma das principais vantagens dos GCLs perfurados com agulha é que eles podem ser instalados em aplicações de inclinação íngreme (por exemplo, em uma inclinação de 45 m de comprimento em uma aplicação de aterros sanitários em uma inclinação de 1:2 (26,6°). Para tais aplicações, é importante avaliar a tensão de cisalhamento de interface da GCL e provar que a tensão de cisalhamento interna da GCL é suficiente para atender aos critérios de projeto.

Matematicamente aproximadamente 2,5 milhões de fibras por  $m^2$  reforçam uma camada de argila bentonítica à medida que são perfuradas com agulhas entre os geotêxteis para fazer um GCL.

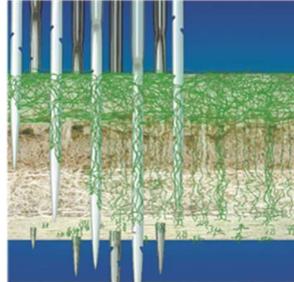


Figura 1. Seção transversal de um GCL perfurado com agulha

As fibras perfuradas com agulha têm uma resistência à tração típica de 40cN, de modo que o reforço pode criar uma tensão de cisalhamento de curto prazo de aproximadamente  $1.000kN/m^2$ . Partindo do princípio de que as inter-travagens do reforço de fibras se completam, deve ser tomado em consideração um fator de segurança para a fluência polimérica. Usando um fator de segurança de 4, obtém-se uma tensão de cisalhamento teórica de longa duração de  $250kN/m^2$ .

Em várias centenas de testes de cisalhamento, a tensão de cisalhamento interna de GCLs foi avaliada após 24 horas de pré-hidratação sem confinar o estresse para simular condições de instalação do caso ou uma instalação subaquática. Os GCLs também variaram no controle de qualidade no valor do pelado, de modo que os resultados da tensão de cisalhamento puderam ser plotados contra o valor do pelado, convertendo a tensão de cisalhamento em tensão de confinamento (solo de cobertura com densidade de  $20kN/m^3$ ) e inclinações de declividade (Figura 2). Uma interceptação de coesão não foi levada em consideração para que os valores obtidos ficassem do lado conservador. Observa-se, na Figura 2, que existe relação entre o valor do pelado e a tensão de confinamento. O plano de cisalhamento está fora do GCL se o valor de resistência ao pelado for superior à aquela inclinação escolhida para a profundidade de cobertura selecionada. O valor A da Figura 2 indica que nenhuma falha interna ocorre para os GCL em taludes 1:1,5 ( $33,7^\circ$ ) com tensão de confinamento de solo de cobertura de 4m ( $80kN/m^2$ ), mas poderia ocorrer com solo de cobertura de 5m.

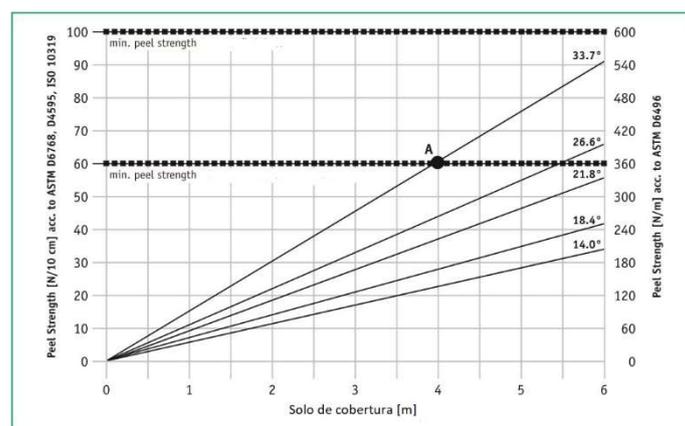


Figura 2. Correlação do pelado para efeitos de cálculo

Pode-se mostrar que os valores do pelado feitos no laboratório de controle de qualidade de uma empresa fabricante (MQC) alcançados para os GCLs satisfazem as necessidades de projeto para a maioria das aplicações de baixa tensão de confinamento.

## 2. Comportamento geral de cisalhamento dos GCLs

Para examinar o comportamento geral de cisalhamento dos GCLs em uma condição hidratada, testes em diferentes tipos de GCL foram realizados após 24 horas de pré-hidratação horizontal sem tensão de confinamento nos laboratórios da Alemanha em uma mesa basculante automática (1m x 1m), os GCLs foram cisalhados entre geomembranas texturizadas (GM). O set-up (Figura 3) foi então carregado com uma brita de 300mm de espessura (aprox. 6kN/m<sup>2</sup>). A caixa foi construída de tal forma que o plano de cisalhamento só poderia ocorrer entre uma das geomembranas e a GCL ou no próprio GCL.



Figura 3. Mesa de inclinação automática e caixa de cisalhamento

Após um tempo de consolidação de curto prazo de 0,5 horas, a caixa foi inclinada a uma taxa de 1°/min. de inclinação.

Alguns resultados representativos dos testes realizados são mostrados na Tabela 1.

Tabela 1. Resultados do valor típico da tabla do corte com testes de inclinação

Estrutura	plano de cisalhamento	ângulo de cisalhamento
Bentonita de 5kg entre dois geotêxteis, fixada com cola solúvel em água	interno	8°
4,5kg bentonita entre dois geotêxteis, perfurada com 8N/10cm de resistência da pelado	interno	18°
Bentonita de 4,5kg entre um não tecido de 200g/m <sup>2</sup> e um tecido de 100g/m <sup>2</sup> , perfurado com uma força de pelado de 65N/10cm	externo (tecido)	22°
Bentonita de 4,5kg, colada por ponto entre dois não tecidos (200g/m <sup>2</sup> )	externo	29°
Bentonita de 4,5kg entre dois não tecidos 300g/m <sup>2</sup> , perfurada com uma força de pelado de 30N/10cm	externo	33°

Os resultados do teste destacam dois fatores significativos no comportamento dos GCLs:

- a) A resistência ao corte dos GCLs perfurados com agulha tem uma influência decisiva no comportamento de cisalhamento.
  - b) Em uma suficiente transferência de força de cisalhamento interna, a seleção dos geossintéticos adjacentes é significativa para a transferência de cisalhamento interface.
- Não tecidos perfurados com agulha de baixo peso (~ 200g/m<sup>2</sup>) e os tecidos apresentam ângulos de cisalhamento mais baixos do que os mais pesados não tecidos perfurados com agulha (~ 300g/m<sup>2</sup>).

### 3. Exemplos de valores de cisalhamento de interface

Ao selecionar um GCL, não é apenas relevante o reforço interno e tensão de cisalhamento, mas o comportamento de cisalhamento da interface é também importante. Para uma primeira suposição, a relação para solos entre os ângulos de atrito de interface dos geotêxteis podem ser assumidos pela equação (1) dada

$$\lambda = \tan \delta' / \tan \phi' \quad (1)$$

na Tabela 2. e comparável com os resultados do ensaio de caixa de cisalhamento. O valor da resistência a fricção do solo ( $\tan \phi'$ ) e da fricção na interfase ( $\tan \delta'$ ) dão como valor o coeficiente de fricção  $\lambda$ . Como um parâmetro comparável. Em qualquer caso, estas estimativas não podem substituir os testes de caixa de cisalhamento por solos do local.

Tabela 2. Fricção de interfase assumida em relação ao geotêxtil e solo

	Não tecido	Tecido
Argila	~ 0.92	~ 0.84
Areia Fina	~ 0.92	~ 0.80
Areia Grossa	~ 0.95	~ 0.83

O ensaio de cisalhamento direto com solos no local deve seguir o mais próximo possível das condições no local, incluindo, por exemplo, o estresse de confinamento e a hidratação do GCL. A Tabela 3. resume a gama de ângulos de cisalhamento que foram alcançados em vários ensaios de cisalhamento de interface contra geossintéticos e solos, e mostra claramente que a GCL em geral alcança ângulos de atrito mais baixos do que os componentes não tecidos perfurados por agulha de uma GCL.

Tabela 3. ângulos de cisalhamento de interface GCL contra geossintéticos ou solos

Geossintético ou solo adjacente	faixa de ângulo de atrito	faixa de ângulo de atrito
	Tecido	Não Tecido
Geomembrana lisa	8 a 12	8 a 12
Geomembrana texturada	10 a 25	18 a 35
Solo superficial	18 a 28	21 a 32
Areia	21 a 28	24 a 32
Cascalho arenoso	23 a 28	25 a 34

### 4. Comportamento de cisalhamento de laboratório a longo prazo

Em abril de 1994, uma empresa fabricante de GCLs em Alemanha construiu vários dispositivos de cisalhamento por fluência em grande escala para avaliar o comportamento de diferentes GCLs tecidos/não tecidos perfurados com agulha, sob condições in-situ simuladas de aplicações de baixa carga normal. O programa de testes incluiu a medição do movimento diferencial de fluência, bem como testes adicionais de cisalhamento pós-teste no material GCL. O material testado foi um produto GCLs (woven carrier, nonwoven cover geotextile). Para garantir a aplicabilidade desses dados a todos os produtos perfurados com agulha tipo standard.

O GCL em teste foi montado em um aparelho de teste de 1m x 1m na seguinte seção transversal (de cima para baixo):

- Chapas de aço 25kN/m<sup>2</sup>
- 300mm de brita britada de 2 a 8mm contida em uma caixa de aço
- GCL com geotêxtil ancorado na chapa de aço inferior

Antes do início do ensaio, todo o aparelho foi gradualmente inclinado para refletir um ângulo de inclinação de 25° (1:2.14), resultando em uma deformação constante de 14kN/m<sup>2</sup>, sob uma tensão de confinamento de aproximadamente 30kN/m<sup>2</sup>. Para garantir saturação completa, a amostra foi hidratada diariamente. Os testes foram iniciados em 17 de abril de 1994 e continuaram até 1° de dezembro de 1998 para um tempo total decorrido de mais de 40.800 horas. Após o carregamento inicial do corpo de prova com a tensão confinante, uma pequena quantidade de movimento foi medida no sistema, associada ao assentamento da brita na caixa de aço. Enquanto o movimento ocorria, não havia rasteira ou alongamento no GCL perfurado com agulha. Independentemente disso, foi incluído nos números finais de deslocamento para garantir o quadro mais conservador.

Com um valor inicial de 2,5mm de movimento, o valor final pouco antes da desmontagem da caixa foi um movimento diferencial total de 2,9mm (inclui o deslocamento) durante o período de mais de 40.000 horas (Figura 4).

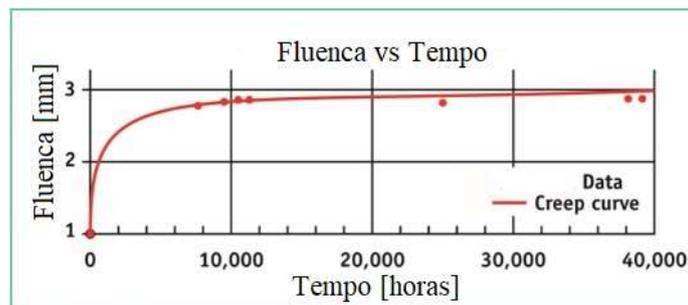


Figura 4. Comportamento de fluência em correlação ao tempo

O GCL foi testado quanto à sua resistência ao peeling e ao cisalhamento após a desmontagem do dispositivo para melhor avaliação do corpo de prova. A resistência mínima da resistência ao pelado ainda estava dentro dos limites certificáveis para o material padrão (maior que 60N/10cm) resp. 360 N/m de acordo com a norma ASTM D6496. Três ensaios de cisalhamento direto, realizados sob hidratação plena e carga normal de 25kPa, mostraram tensão de cisalhamento máxima de 64,8kPa, 78,4kPa e 84,1kPa, após mais de 40.800 horas de ensaios de fluência.

Embora a resistência à fluência de um material esteja diretamente relacionada com as próprias fibras perfuradas por agulha, testes semelhantes em outras variações do GCL refletem a mesma conclusão, que os GCLs do estilo tecido/não tecido são resistentes aos efeitos de longo prazo da deformação constante sob baixas cargas normais.

## 5. Estudo de campo de longa duração

Esse desempenho de cisalhamento a longo prazo dos GCL perfuradas com agulha também foi confirmado no estudo de estabilidade de taludes da EPA de Cincinnati (Figura 5), onde várias amostras de diferentes fabricantes foram instaladas em taludes de 1:2 (26°), com 30m de comprimento. Os GCLs não falharam interna ou Inter facialmente. Uma GCL não reforçada falhou internamente na camada de bentonita devido à hidratação da bentonita. Em duas outras lâminas, o solo de cobertura, a rede de drenagem e a geomembrana que sobrepõe a GCL deslizaram na interface mais fraca entre o lado tecido da GCL e a geomembrana texturizada. Em ensaios de cisalhamento direto foi determinado que esta interface só parecia ter um ângulo de atrito de aproximadamente 20° a 24°, muito baixo para uma inclinação de 1:2. Em inclinações 1:3 (18,4°) ou mais íngremes, recomenda-se, portanto, o uso de GCLs perfuradas com agulha com não tecidos perfurados por agulha em ambos os lados.

## 6. Conclusão

Os materiais geossintéticos de argila perfurados com agulha apresentam muitas vantagens técnicas. Além da baixa condutividade hidráulica, da capacidade de auto-vedação e das propriedades de alongamento, o valor do pelado e a resistência ao cisalhamento são critérios importantes para a eficiência a longo prazo dos GCLs. A exigência de uma resistência mínima ao pelado é necessária para cada aplicação de inclinação. É importante que a prova de estabilidade a longo prazo seja realizada. A fim de alcançar o ângulo de atrito de interface necessário contra as interfaces adjacentes (por exemplo, geomembrana texturizada ou solo), os não tecidos ligados mecanicamente ou agulhados são especialmente adequados. Com uma massa por unidade de área de  $\geq$  de 200g/m<sup>2</sup> é alcançado um bom desempenho de cisalhamento da interface. Os exames existentes sobre o desempenho a longo prazo das GCLs mostram que os mantos geossintéticos de argila perfurados com agulha são barreiras de vedação previsíveis e fornecem estabilidade a longo prazo.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] Von Maubeuge, K.P., Eberle, M.A. »Can geosynthetic clay liners be used on slopes to achieve long-term stability«, 3rd International Congress on Environmental Geotechnics, Lisboa, Portugal, Sept. 1998, 375-380.
- [2] Heerten, G.; Saathoff, F.; Scheu, C.; von Maubeuge, K.P.; »On the long-term shear behaviour of geosynthetic clay liners (GCLs) in capping sealing systems«; Proceedings of the International Symposium Geosynthetic Clay Liners, Nuernberg, April 1995, 141 - 150.
- [3] Grett, H.D. »Das Reibungsverhalten von Geotextilien in bindigem und nichtbindigem Boden« Heft 59, Mitteilungen des FranziusInstitut für Wasserbau und Küsteningenieurwesen, Hannover, 1984.
- [4] Koerner, R.M., Carson, D.A., Daniel, D.E., Bonaparte, R. »Update of the Cincinnati test plots«, Geo-Bento '98, Paris, February 1998.