

# REFORÇO DE UM SOLO COM PLASTICIDADE ELEVADA COM FIBRAS DE CÂNHAMO E ESTABILIZAÇÃO QUÍMICA PARA CAMADAS DE BASE E SUB-BASE DE PAVIMENTOS RODOVIÁRIOS

Filipe Martins<sup>1</sup>, Vítor Antunes<sup>2</sup> e João Crucho<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Universidade Lusófona de Humanidades e Tecnologias, Faculdade de Engenharia, Tel: 217515500, Campo Grande 376, 1749-024 Lisboa, Portugal email: filipe.martins@msn.com <https://www.ulusofona.pt/feg>

<sup>2</sup> CERIS, Universidade Lusófona de Humanidades e Tecnologias, Faculdade de Engenharia, Tel: 217515500 Campo Grande 376, 1749-024 Lisboa, Portugal

<sup>3</sup> CERIS, Instituto Superior Técnico, Universidade de Lisboa, Departamento de Engenharia Civil, Arquitectura e Georecursos, Av. Rovisco Pais, 1049-001 Lisboa, Portugal

---

## Sumário

*Este artigo tem por base o desenvolvimento de uma investigação laboratorial sobre a estabilização de uma areia argilosa com elevada plasticidade utilizando cimento e um reforço com fibras de cânhamo. De forma a avaliar o desempenho mecânico foram realizados ensaios de compressão uniaxial e compressão diametral em provetes com 1, 7 e 28 dias de cura. Adicionalmente, foram realizados ensaios de Californian Bearing Ratio com e sem período de embebição. Verificou-se que a aplicação de fibras de cânhamo permitiu um aumento da resistência mecânica do solo estabilizado e, como previsto, a introdução de fibras permitiu que a resistência do material não reduzisse drasticamente após o surgimento da fenda, mostrando uma redução mais gradual.*

---

Palavras-chave: Bio-resíduos; Economia Circular; Fibras de cânhamo; Pavimento rodoviário; Sustentabilidade.

## 1 INTRODUÇÃO

As infraestruturas de transporte apresentam um papel fundamental no desenvolvimento social e económico dos países, sendo o transporte rodoviário um dos meios dominantes dadas as suas características. A minimização dos custos económicos e impactos ambientais associados a todo o ciclo de vida da infraestrutura de transporte rodoviário tem sido uma preocupação para as entidades gestoras, donos de obra e empreiteiro, tendo um foco especial nos últimos anos com a necessidade de atingir metas de sustentabilidade definidas a nível global. Como tal, a utilização de solos locais estabilizados quimicamente, com cimento e/ou outros ligantes hidráulicos, tem se mostrado como uma solução viável e que possibilita a redução das necessidades de saneamento de elevadas quantidades de material e consequentemente das necessidades de transporte.

Solos de elevada plasticidade, de forma geral, apresentam características geotécnicas, nomeadamente uma reduzida resistência e valores elevados de compressibilidade, muito deficitárias relativamente ao seu uso em camadas de base e sub-base de pavimentos. A estabilização destes solos com ligantes tem se apresentado como uma solução viável, contudo existe uma tendência para estes materiais apresentarem fendilhamento, tanto pela hidratação e retração promovida pelo ligante como pelas próprias características deste tipo de solos. A inclusão de fibras naturais em solos com respetiva estabilização química, surge com a necessidade do uso dos mesmos para camada base e sub-base de pavimentos rodoviários, sendo esta uma opção mais sustentável e económica. A adição de fibras naturais de cânhamo, apresentando estas elevada resistência mecânica, permite realizar um reforço do material estabilizado, criando uma matriz resistente que por um lado evita a abertura de fendas e por outro após o fendilhamento da camada estabilizada permite que esta se comporte como uma camada solidária. Estas fibras apresentam-se como bio-resíduos criados pelo ressurgimento e crescimento da indústria da produção de cânhamo. A melhoria das camadas inferiores de um pavimento rodoviário com base no solo já presente no local para colmatar a necessidade de terras de empréstimo e todos os encargos sejam estes financeiros e simultaneamente ambientais, tem sido largamente investigada, sendo uma das opções a utilização de fibras.

## **2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA**

O solo, considerado o material de construção mais comum e em maior abundância, e com vista à sua utilização na execução de pavimentos, terá de sofrer de forma geral, um processo de melhoramento com a finalidade de o capacitar de propriedades físicas e mecânicas superiores às originais.

A estabilização mecânica é o método mais antigo e ainda o mais utilizado, baseando-se essencialmente este tipo de metodologia numa redução da quantidade de vazios através da aplicação de energia mecânica e/ou alteração granulométrica do mesmo com a adição de um ou mais tipos de solos com determinadas características, com a finalidade de melhorar a sua resistência, permeabilidade, compressibilidade, absorção de água e estabilidade. Associada à estabilização mecânica, pode também ser utilizada a estabilização através de agentes químicos que alteram a estrutura do solo a utilizar, este tipo de estabilização ocorre habitualmente com a adição de ligantes hidráulicos como cimento e cal, cinzas volantes ou materiais betuminosos, tendo em conta o tipo de solo e a solicitação que a camada terá na sua vida útil.

A planta do cânhamo, uma das plantas cultivadas com o intuito da produção de fibras com diversas finalidades como por exemplo a indústria cosmética, a têxtil ou a papelera, é originária da Ásia central, mas cuja expansão em termos de cultivo se dá por praticamente o todo o globo terrestre, devido à sua facilidade de adaptação climática. As plantas têm uma altura variável entre 1 e 5 metros com diâmetros compreendidos entre 0.5 e 1 cm. As plantas com aproximadamente 2 metros de comprimento e 1 centímetro de diâmetro apresentam as características ótimas para a extração de fibras. A zona exterior da planta é constituída por fibras elementares distribuídas ao longo da totalidade do caule, suportando e protegendo os restantes tecidos da planta, estas conferem flexibilidade e elasticidade à planta, os feixes de fibra não são homogêneos e representam 15 a 25% da massa do caule seco [1].

Diversos tipos de fibras que poderão ser utilizadas no reforço de solos mais especificamente na estrutura base de um pavimento, as camadas de base e sub-base, estas mesmas fibras podem ser de origem natural ou sintética.

As fibras naturais são utilizadas para a melhoria de materiais utilizados na construção desde há milénios com o uso de feno e palha na produção de blocos construtivos primitivos habitualmente denominados como adobes, referem-se ainda utilizações destas mesmas fibras nas civilizações antigas, a Egípcia e a Inca, a título de exemplo já empregavam estas técnicas de estabilização e reforço de solos [2]. Já existem estudos sobre a aplicação de fibras naturais como as de coco, sisal, linho ou bambu, sendo que os estudos efetuados apresentam resultados promissores quanto à sua utilização [3,4]. A utilização de fibras sintéticas também largamente estudadas com resultados também estes bastante satisfatórios, com por exemplo a utilização de fibras de polipropileno, fibras de vidro, fibras de poliéster ou fibras de polietileno.

Atualmente, as preocupações ambientais estão no topo das prioridades globais e com a retoma da utilização das fibras naturais que no caso do reforço de solos habitualmente será feita com os excedentes e resíduos de outras indústrias que as usam inicialmente serão evitadas emissões poluentes associadas à utilização de outra tipologia de reforço de solos, sendo esta uma opção ecologicamente correta e de baixo custo [5].

Nos últimos anos têm sido vistos desenvolvimentos na área da estabilização de solos com fibras de origem vegetal, muito devido ao seu baixo custo, baixa densidade, resistências elevadas comparáveis às de fibras de origem sintética, não são tóxicas e normalmente existem em abundância e têm como origem fontes renováveis.

## **3 MATERIAIS**

De forma a obter um solo com características que correspondem a uma classificação de G9 ou superior segundo as especificações Sul-Africanas [6], foi realizada uma composição laboratorial de um solo. Foram assim utilizados um solo argiloso da zona de Lisboa, sendo este designado por “solo de fundação”, e duas frações de areia de rio lavada graduada, tendo este solo composto sido designado por “solo modificado”, sendo este o solo a utilizar para a estabilização e reforço para posterior utilização como camada de sub-base e base em infraestruturas rodoviárias. O “solo modificado” resultou assim da composição laboratorial com 50% de “solo de fundação” e de areia de rio lavada e graduada com 40% da fração 0/2 mm e 10% da fração 2/4 mm. O Quadro 1 apresenta as propriedades dos solos utilizados no estudo antes e após composição laboratorial em termos dos limites de Atterberg (limite de liquidez, limite de plasticidade), índice de retração linear, equivalente de areia, massa volúmica do solo e valor de azul-de-metileno.

Quadro 1. Propriedades do solo

Ensaio	“Solo de fundação”	“Solo modificado”
Limite de Liquidez (%)	46,5	34,4
Limite de Plasticidade (%)	19,9	18,2
Índice de Plasticidade (%)	26,6	19,3
Retração Linear (%)	10,4	8,6
Equivalente de Areia	0,0	13,9
Massa Volúmica (g/cm <sup>3</sup> )	2,73	2,65
Azul-de-Metileno (g/100 g de solo)	3,4	2,0

Com base nas propriedades apresentadas no Quadro 1 e na granulometria do solo, o “solo de fundação” classifica-se como uma argila magra (CL) e o “solo modificado” como areia argilosa (SC) segundo a classificação unificada de solos [7]. De acordo com a classificação AASHTO para fins rodoviários [8] o “solo de fundação” e o “solo modificado” classificam-se como um solo A-7-6 e A-6, respetivamente.

As fibras de cânhamo foram obtidas através dos ramos na sua condição natural (Fig.1), para a extracção das fibras do caule, os ramos foram submersos em água durante 48h, de forma a facilitar a separação entre o caule e as fibras exteriores necessárias. A extração e a separação das fibras foram realizadas de forma manual, recorrendo-se a processos baseadas na utilização histórica das fibras de cânhamo. A necessidade de separação deve-se a que durante a extração apenas se obtém um conjunto de fibras aglomerado, em forma de capa ou casca (Fig.2), cobrindo esta o caule da planta. Posteriormente a estes processos, as fibras depois de separadas foram cortadas com aproximadamente 10 cm de comprimento (Fig.3). De forma a minimizar as necessidades energéticas e consequentemente aumentando a sustentabilidade da solução, definiu-se o processo de secagem das fibras à temperatura ambiente. A seleção do comprimento da fibra e a quantidade de fibra a incorporar foram baseados em indicações da literatura [9] e confirmados pela realização de provetes com diferentes taxas de incorporação de fibras e vários comprimentos de fibras. Adotou-se um comprimento ótimo de 10 cm e uma percentagem de incorporação de fibras de 0,1% por massa total do provete.

A estabilização química foi realizada recorrendo a cimento de Portland do tipo CEM II/B-L 42,5R utilizando-se uma percentagem de 3% por massa total do provete, tendo esse valor sido definido num estudo anterior [10].



Fig. 1. Ramo original da planta de cânhamo



Fig. 2. Fibras após extração do caule



**Fig. 3. Fibras separadas e cortadas**

## **4 METODOLOGIAS DE ENSAIO**

### **4.1 Ensaio Proctor**

Foi utilizada uma massa total de 5400 g da mistura solo, cimento, fibras e água com diferentes percentagens de água adicionada, de forma a determinar o teor em água ótimo e o peso volúmico aparente seco máximo que corresponde a máxima compactação do solo estabilizado com cimento e reforçado com fibras. O ensaio foi realizado considerando a compactação Proctor pesada em molde grande com base na especificação LNEC E 197 [11], variando apenas a altura final do provete, sendo que esta corresponde a uma altura de aproximadamente 127 mm que corresponde à altura preconizada na normalização Sul-Africana *TMH 1 Method A7* [12], dado que os resultados obtidos neste estudo serão comparados com resultados obtidos num estudo anterior [10].

Os provetes para os ensaios de caracterização de desempenho foram igualmente produzidos com recurso à compactação pesada Proctor em molde grande, para o teor em água ótimo determinado.

### **4.2 Californian Bearing Ratio**

A determinação do *Californian Bearing Ratio* (CBR) foi realizada de acordo com a especificação LNEC E 198 [13] tendo sido produzidos provetes de “solo modificado”, “solo modificado” tratado com 3% de cimento e “solo modificado” tratado com 3% de cimento e reforçado com 0,1% de fibras. Após a compactação, e seguindo a especificação LNEC E 198, os provetes foram submergidos durante 96 horas com as placas de carga e com o tripé com deflectómetro, sendo efectuada a leitura no deflectómetro inicialmente e ao longo do período de embebição, verificando-se a estabilidade das leituras nas últimas 24h. Após a embebição dos provetes, os mesmos foram submetidos ao ensaio de penetração com um pistão normalizado a uma velocidade de 1 mm/min, sendo feita a leitura às penetrações normalizadas.

### **4.3 Californian Bearing Ratio imediato**

Nos ensaios de determinação do *Californian Bearing Ratio* imediato (CBR<sub>i</sub>) foram igualmente produzidos provetes de “solo modificado”, “solo modificado” tratado com 3% de cimento e “solo modificado” tratado com 3% de cimento e reforçado com 0,1% de fibras. Após a compactação os provetes moldados foram submetidos a

uma penetração de um pistão normalizado a uma velocidade de 1mm/min, tendo por base a norma francesa NF P94-078.

#### 4.4 Ensaio de compressão uniaxial

O ensaio de determinação da resistência à compressão uniaxial ou compressão simples foi realizado de acordo com a norma EN 13286-41 [14] até à sua rotura, tendo sido estabelecido como critério de rotura a diminuição de 50% da força máxima aplicada. Os ensaios foram realizados sobre provetes de “solo modificado” tratado com 3% de cimento e reforçado com 0,1% de fibras compactados considerando o teor ótimo em água e colocados em ambiente húmido para ocorrer a cura do cimento, tendo sido consideradas as idades de 1, 7 e 28 dias. Os provetes compactados foram desmoldados ao fim de 24h, mantendo-se a cura, nos casos aplicáveis, sobre os provetes já desmoldados

#### 4.5 Ensaio de tração indirecta

Tal como para os ensaios de compressão uniaxial, os provetes de foram produzidos recorrendo à compactação Proctor e curados igualmente durante 1, 7 e 28 dias, seguindo-se o mesmo processo para a desmoldagem e cura. Para a determinação da resistência à tração indirecta, após os respectivos dias de cura, os provetes foram submetidos ao ensaio de compressão em relação a duas geratrizes opostas através de barras de transferencia de carga em prensa seguindo a normalização EN 13286-42 [15] até à sua rotura, tendo-se igualmente estabelecido como critério de rotura a diminuição de 50% da força máxima aplicada.

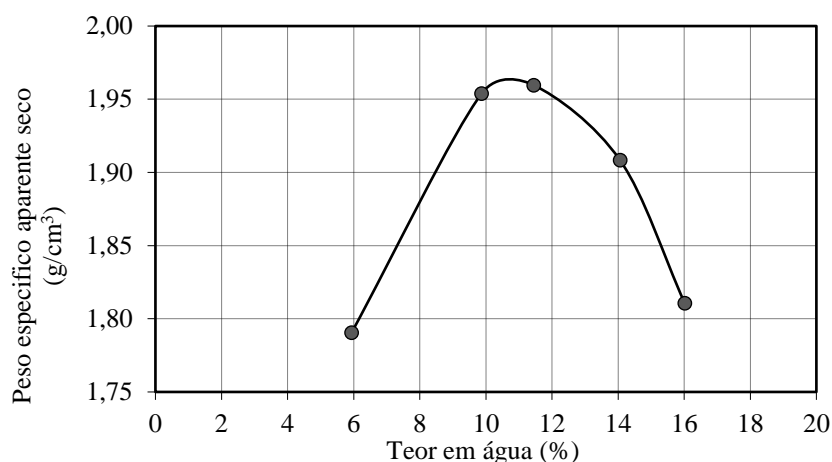
## 5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

A Fig. 4 apresenta a curva de compactação do “solo modificado” estabilizado com 3% de cimento e reforçado com 0.1% de fibras para compactação pesada em molde grande, tendo sido utilizados 5 teores em água diferentes. A solução em estudo apresentou um teor em água ótimo ( $w_{opt}$ ) de 11,2% e um peso específico aparente seco máximo ( $\gamma_{dm\acute{a}x}$ ) de 1,97 g/cm<sup>3</sup>.

O Quadro 2 apresenta os resultados do teor em água ótimo e do peso volúmico aparente seco máximo das várias configurações de solo avaliadas. Verifica-se que a modificação do “solo de fundação” com areia diminui o teor em água ótimo. Quando adicionado a percentagem de cimento e posteriormente a percentagem de fibras o teor em água ótimo aumenta, numa primeira fase devido à necessidade de hidratação do cimento e com a adição de fibras devido às fibras apresentarem uma superfície específica elevada que leva a que absorvam água.

Quadro 2. Teor em água ótimo e peso volúmico aparente seco máximo

Propriedade	Solo fundação	Solo modificado	Solo modificado + 3% cimento	Solo modificado + 3% cimento + 0,1% fibras
$\gamma_{dm\acute{a}x}$ (g/cm <sup>3</sup> )	1,850	2,110	2,025	1,970
$w_{opt}$ (%)	16,0	8,5	10,0	11,2

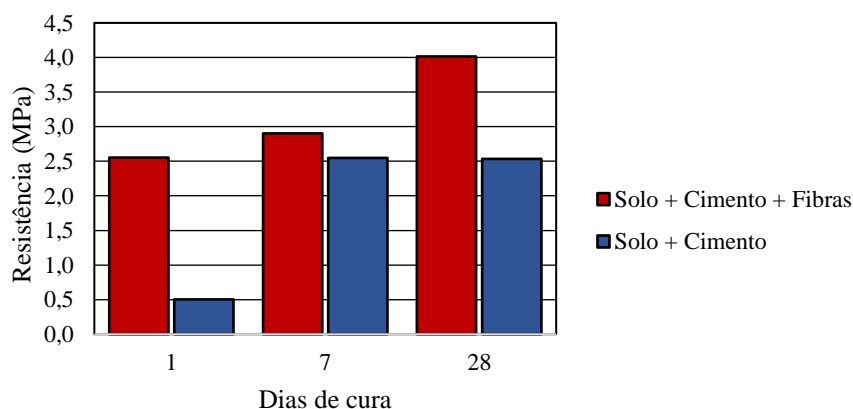


**Fig. 4. Ensaio de compactação - teor em água ótimo**

A Fig. 5 apresenta os resultados obtidos para a resistência à compressão uniaxial, com os tempos de cura de 1, 7 e 28 dias de cura, dos provetes de “solo modificado” estabilizado com 3% de cimento e dos provetes de “solo modificado” estabilizados com 3% de cimento e reforçados com 0,1% de fibras. Os provetes estabilizados com a mistura de “solo modificado”, cimento e fibras tiveram um acréscimo de resistência do 1º dia de cura para o 7º dia de cura de 14% e do 7º para o 28º dia de cura um crescimento de 38% de resistência, enquanto os estabilizados com a mistura de solo e cimento um acréscimo de 407% de resistência comparando o 1º com o 7º dia de cura, relativamente à evolução do 7º para o 28º dia de cura não houve alterações consideráveis na resistência dos provetes.

Analisando comparativamente os resultados dos ensaios da mistura de “solo modificado”, cimento e fibras com os resultados da mistura de “solo modificado” e cimento, verifica-se que a resistência à compressão nos provetes com adição de fibras de cânhamo aumenta em todos os dias de cura analisados, sendo a maior diferença ao 1º dia de cura devido à ancoragem das fibras com uma resistência 410% superior à dos provetes sem fibras, ao 7º dia de cura observa-se uma diferença de 14% e ao 28º dia uma diferença de 58%.

A Fig. 6 apresenta o aspeto de um provete após o ensaio de compressão uniaxial. Observando-se o provete é possível constatar que apesar do critério de rotura definido, de redução de 50% da força máxima aplicada, o provete apresenta ainda uma forma cilíndrica, não apresentando destaques significativos das laterais, como ocorre frequentemente em materiais não reforçados. É assim possível demonstrar que a incorporação de fibras confere uma resistência adicional, mesmo após a rotura, sendo que o provete apresenta o comportamento de um material solidário, permitindo a transferência de cargas, dada a ancoragem das fibras ao longo do provete.



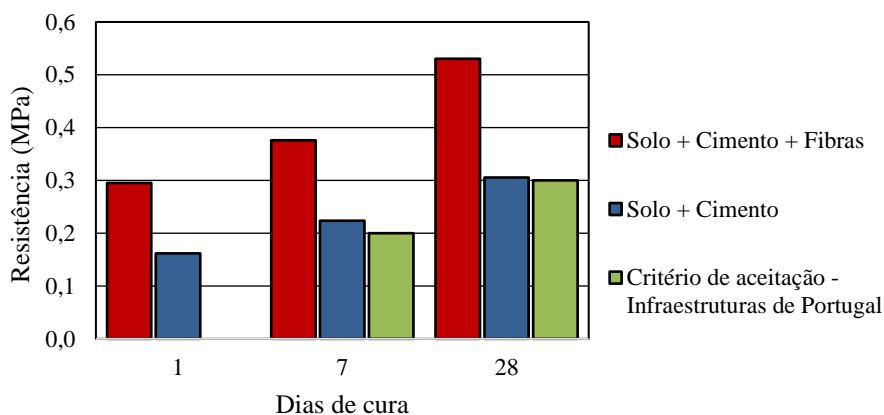
**Fig. 5. Análise da resistência à compressão uniaxial**



**Fig. 6 . Provete após ensaio de compressão uniaxial**

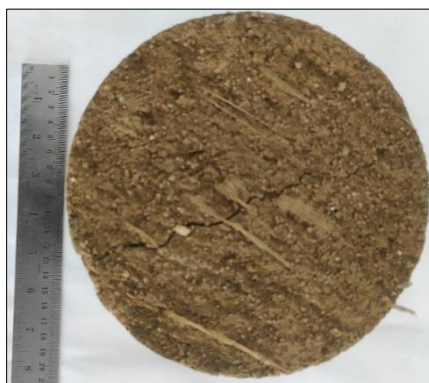
Relativamente aos ensaios da resistência à tração indireta (7), foram similarmemente aos ensaios da compressão uniaxial efetuados ensaios aos provetes com curas de 1, 7 e 28 dias. Os provetes estabilizados com a mistura de solo, cimento e fibras tiveram um acréscimo do 1º dia de cura para o 7º dia de cura de 27% de resistência, enquanto os estabilizados com a mistura de solo e cimento um acréscimo de 38% de resistência comparando o 7º com o 1º dia de cura, analisando o 7º dia de cura com o 28º dia de cura observa-se um acréscimo de 41% nos provetes com adição de fibras e um acréscimo de 37% nos provetes sem fibras.

Analisando comparativamente os resultados dos ensaios da mistura de solo, cimento e fibras com os resultados da mistura de solo e cimento, observa-se que os provetes com fibras ao 1º dia de cura têm uma resistência ao corte indireto 83% superior à dos provetes sem fibras, ao 7º dia observa-se que os provetes com fibras têm uma resistência 68% superior e ao 28º dia uma resistência 73% superior.



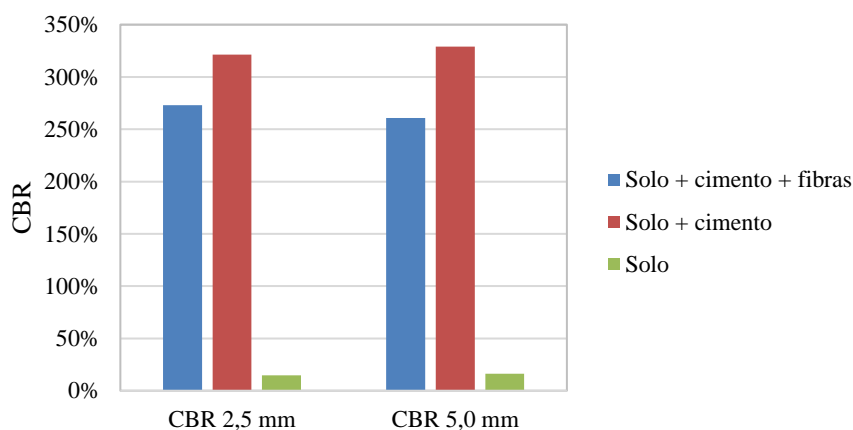
**Fig. 7. Análise da resistência à tração indireta**

A Fig. 8 apresenta um provete apos o ensaio de tração indirecta. Apesar do critério de rotura imposto, de 50% de redução da carga máxima aplicada que levou ao surgimento de uma fenda ao longo do eixo central do provete ligando as duas geratrizes opostas, não ocorreu a separação das duas metades do provete cilíndrico. Este comportamento deve-se à existência de fibras ao longo do provete que mitigam o efeito do surgimento de fendas, permitindo que a carga continue a ser transmitida e que se garanta uma resistência à tração indirecta apesar de a camada apresentar já fendilhamento.



**Fig. 8. Provette após ensaio de tracção indirecta**

Relativamente aos resultados dos ensaios de determinação do *California Bearing Ratio* (CBR) (Fig. 9), o “solo modificado” estabilizado com cimento apresentou resultados superiores aos do “solo modificado” estabilizado com cimento e reforçado com fibras, contudo os resultados obtidos por ambos são muito superiores aos do “solo modificado” apresentando uma variação no valor do CBR de 306% e 258%, respetivamente. A introdução das fibras leva a um aumento do índice de vazios dos provetes, conseqüentemente este aumento levará a uma diminuição do índice de CBR, uma vez que este índice é calculado para a penetração de um pistão a uma determinada profundidade, sendo que parte da penetração leva a um adensamento do material e não a uma sollicitação da resistência por parte do material. Adicionalmente, durante a penetração do pistão nos provetes reforçados com fibras, como as fibras se encontram aleatoriamente distribuídas ao longo do material, pode ocorrer o surgimento de uma ou mais fibras perpendiculares ao sentido de cravação do pistão o que levará a um arrastamento das mesmas, após a sua desancoragem, e conseqüentemente ao desenvolvimento de uma superfície de escorregamento reduzindo a força necessária para a cravação do pistão às profundidades normalizadas.



**Fig. 9. Valores CBR para 2,5 mm e 5,0 mm**

A Fig. 10 apresenta os resultados *California Bearing Ratio* imediato ( $CBR_i$ ) para as profundidades de penetração de 2,5 mm e 5 mm do “solo modificado” estabilizado com cimento e do “solo modificado” estabilizado com cimento e reforçado com fibras. Em concordância com os ensaios de determinação do (CBR), os resultados dos ensaios de determinação do *California Bearing Ratio* imediato ( $CBR_i$ ), verificou-se também uma maior resistência “solo modificado” e estabilizado com cimento quando comparado com os resultados obtidos para o “solo modificado” estabilizado com cimento e reforçado com fibras, verificando-se uma diferença de 64% e 43% para as profundidas de cravação de 2,5 mm e 5,0 mm, respetivamente. Esta diminuição de resistência deve-se aos motivos anteriormente apresentados para o CBR.



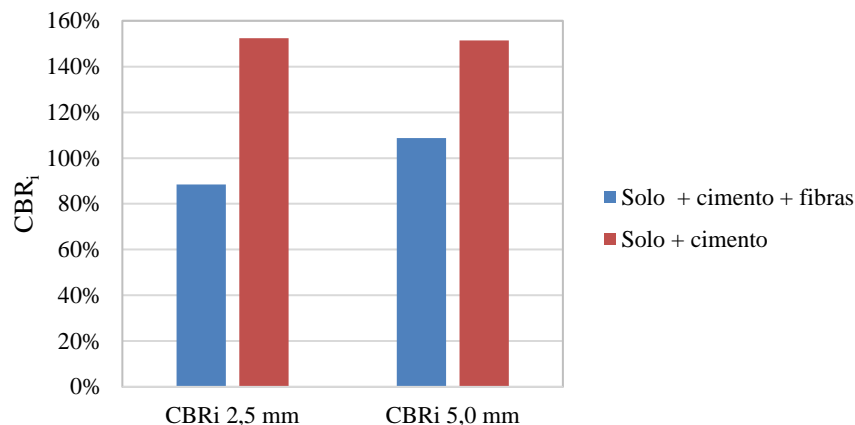


Fig. 10. Valores CBR imediato para 2,5 mm e 5,0 mm

## 6 CONCLUSÕES

Os solos com plasticidade elevada apresentam frequentemente propriedades deficitárias para serem utilizados como material de construção, neste caso específico para as camadas base e sub-base de pavimentos. Uma opção a ser considerada quando estes tipos de solos se encontram no local de implantação do pavimento será a sua estabilização, de forma a melhorar as suas características. O presente estudo demonstra que as suas propriedades podem ser melhoradas utilizando um bio-resíduo, as fibras de cânhamo, aliado a uma estabilização química através de um ligante hidráulico (cimento Portland). A adição de fibras de cânhamo em solos estabilizados é uma forma de valorizar este bio-resíduo, atualmente sem valor económico, mitigando um potencial problema ambiental derivado do crescimento da indústria de produção de cânhamo. É de salientar que com a utilização dos solos existentes no local de implantação, as necessidades de saneamento de material são reduzidas, diminuindo assim a necessidade de transporte do mesmo. Através da realização de um estudo laboratorial foi possível verificar o seguinte:

- A resistência à compressão uniaxial dos provetes de solo estabilizado com cimento e reforçado com fibras revelaram um aumento médio de 161% para as idades de cura de 1, 7 e 28 dias quando comparados com os provetes apenas estabilizados com cimento.
- A resistência à compressão obtida para 1 dia de cura para o solo reforçado com fibras permite atingir um valor semelhante ao valor da resistência do solo simplesmente estabilizado com cimento aos 28 dias de cura, o que no caso de uma aplicação real permite de uma forma mais célere a aplicação das camadas superiores e consequente abertura da estrada ao tráfego.
- A introdução de fibras conduziram a um aumento médio da resistência à tração indireta de 78% quando comparados com os provetes de solo estabilizado com cimento mas sem a introdução de fibras.
- O reforço com fibras permite que mesmo após a rotura do material o material apresente ainda resistência, funcionando como um material solidário e que permite a transferência dos carregamentos aplicados.
- O solo estabilizado com cimento revelou maiores CBR e ao CBR<sub>i</sub> quando comparado com o solo estabilizado com cimento e reforçado com fibras estando esta diferença relacionada com o aumento do índice de vazios dos provetes reforçados com fibras. Esta aumento do índice de vazios leva a que para uma mesma penetração se desenvolvam menores resistências, uma vez que parte da penetração leva a um adensamento do material e não a uma real solicitação da resistência do material. Além disso, as fibras podem gerar superfícies de deslizamento preferenciais que facilitam a penetração do pistão.

De um modo geral foi possível verificar um aumento significativo de resistência mecânica nos provetes com fibras em relação aos resultados dos provetes sem fibras. É de salientar que mesmo após a rotura do provete os valores de resistência não reduzem imediatamente para zero, apresentando uma diminuição progressiva, o que indica que as fibras continuam a fornecer alguma resistência, permitindo a distribuição de cargas ao longo da camada. Mesmo no caso do desenvolvimento de fendas por tração, onde os materiais estabilizados com cimento apresentam uma resistência nula após o surgimento da fenda, a introdução de fibras permite mitigar o surgimento destas fendas assim como a sua propagação, verificando-se ainda resistência à tração após a abertura da fenda.

## AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem ao Laboratório Nacional de Engenharia Civil todo o apoio prestado durante o estudo experimental.

## REFERÊNCIAS

1. C. Baptista, N.F. Santos, Cânhamo - Aplicações Papeleiras, Agroforum. (1999) 37–40. [https://repositorio.ipcb.pt/bitstream/10400.11/5965/1/Agroforum\\_N.14\\_37-40.pdf](https://repositorio.ipcb.pt/bitstream/10400.11/5965/1/Agroforum_N.14_37-40.pdf).
2. S.M. Hejazi, M. Sheikhzadeh, S.M. Abtahi, A. Zadhoush, A simple review of soil reinforcement by using natural and synthetic fibers, *Constr. Build. Mater.* 30 (2012) 100–116. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2011.11.045>.
3. J. Crucho, L. Picado-Santos, J. Neves, Cement-treated pavement layers incorporating construction and demolition waste and coconut fibres: a review, *Int. J. Pavement Eng.* (2021) 1–20. <https://doi.org/10.1080/10298436.2021.1984475>.
4. K. Ghavami, R.D. Toledo Filho, N.P. Barbosa, Behaviour of composite soil reinforced with natural fibres, *Cem. Concr. Compos.* 21 (1999) 39–48. [https://doi.org/10.1016/S0958-9465\(98\)00033-X](https://doi.org/10.1016/S0958-9465(98)00033-X).
5. H. Bhatt, Performance and Analysis of Coir Fibre as Soil Reinforcement, *Int. J. Res. Appl. Sci. Eng. Technol.* V (2017) 62–72. <https://doi.org/10.22214/ijraset.2017.11009>.
6. SANRAL, South African Pavement Engineering Manual - Chapter 3 - Materials Testing, Second edi, e South African National Roads Agency SOC Ltd, 2014.
7. ASTM, ASTM D2487 - 11 - Standard Practice for Classification of Soils for Engineering Purposes (Unified Soil Classification System), (2011). <https://doi.org/10.1520/D2487-11>.
8. AASHTO, AASHTO M145: Standard Specification for Classification of Soils and Soil-Aggregate Mixtures for Highway Construction Purposes, (1991).
9. J. Crucho, L. Picado-Santos, J. Neves, Mechanical Performance of Cement Bound Granular Mixtures Using Recycled Aggregate and Coconut Fiber, *Appl. Sci.* 12 (2022) 1936. <https://doi.org/10.3390/app12041936>.
10. V. Antunes, N. Simão, A.C. Freire, A Soil-Cement Formulation for Road Pavement Base and Sub Base Layers : a Case Study, *Transp. Infrastruct. Geotechnol.* (2017) 1–16. <https://doi.org/10.1007/s40515-017-0043-9>.
11. LNEC, E 197-1966. Solos: Ensaio de Compactação, Lisboa, Portugal, 1966.
12. CSIR, TMH1-A7:1986. Tests on soils and gravels. Method A7: The determination of the maximum dry density and optimum moisture content of gravel, soil and sand., Pretoria, South Africa, 1986.
13. LNEC, E 198-1967. Soils: Determination of the CBR (in portuguese), Lisbon, Portugal, 1967.
14. CEN, EN 13286-41: 2003 - Unbound and hydraulically bound mixtures. Part 41: Test method for the determination of the compressive strength of hydraulically bound mixtures, IPQ, Brussels, 2003.
15. CEN, EN 13286-42: 2003 - Unbound and hydraulically bound mixtures. Part 42: Test method for the determination of the indirect tensile strength of hydraulically bound mixtures, IPQ, Brussels, 2003.