

145 março
marzo
march
2019

GEOTECNIA



Sociedade Portuguesa de Geotecnia



Associação Brasileira de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica



Sociedad Española de Mecánica del Suelo e Ingeniería Geotécnica

EDITOR		EDITOR ASSOCIADO / EDITOR ASOCIADO / ASSOCIATE EDITOR	
António Gomes Correia, UMinho, Portugal		Alberto Sayão, PUC-Rio, Brasil	Fernando Pardo de Santayana, CEDEX, España
COMISSÃO EXECUTIVA / COMISIÓN EJECUTIVA / EXECUTIVE BOARD			
Ana Cristina Sieira, UERJ, Brasil	César Sagaseta, U. Cantabria, España	José Estaire, CEDEX, España	
Nuno Guerra, UNL, Portugal	Paulo Cesar Maia, UENF, Brasil	Paulo Pinto, FCTUC, Portugal	

A Revista Geotecnia foi publicada pela primeira vez em junho de 1971, com Úlpio Nascimento como fundador e José Folque como primeiro Diretor. Desde essa data tem vindo a publicar-se ininterruptamente. Em março de 2007 passou a ser editada conjuntamente pela SPG, ABMS e ABGE, desde março de 2011 pela SPG e ABMS e a partir de julho de 2014 pela SPG, ABMS e SEMSIG.

La Revista Geotecnia fue publicada por primera vez en junio de 1971, con Úlpio Nascimento como fundador y José Folque como primer Director. Desde esa fecha se viene publicando ininterrumpidamente. En marzo de 2007 pasó a ser editada conjuntamente por la SPG, la ABMS y la ABGE; desde marzo de 2011 por la SPG y la ABMS; y a partir de julio de 2014 por la SPG, la ABMS y la SEMSIG.

"Geotecnia" was published for the first time in June 1971. Its founder was Úlpio Nascimento and its first Editor was José Folque. Since that date it has been continuously published. From March 2007 it became published jointly by the Geotechnical Societies of Portugal and Brazil: SPG, ABMS and ABGE. From January 2011 it was published by SPG and ABMS and, since June 2014 it is published by the Geotechnical Societies of Portugal, Brazil and Spain: SPG, ABMS and SEMSIG.

COMISSÃO EDITORIAL/COMISIÓN EDITORIAL/EDITORIAL BOARD

André P. Assis, U. Brasília, Brasil	Helder I. Chaminé, ISEP, P. Porto; GeoBioTec, U. Aveiro, Portugal
Antonio Gens Solé, U P. Cataluña, Barcelona, España	Jorge Zornberg, U. Texas, Austin, EUA
António Silva Cardoso, FEUP, Porto, Portugal	José Luis de Justo Alpañés, U. Sevilla, España
Antonio Soriano Peña, U. P. Madrid, España	José Vieira de Lemos, LNEC, Lisboa, Portugal
António Viana da Fonseca, FEUP, Portugal	Leandro Alejano Monge, U. Vigo, España
Claudio Olalla Maraño, U P. Madrid, España	Manuel Pastor Pérez, U. P. de Madrid, España
Carlos Oteo Mazo, U. Coruña, España	Manuel Romana Ruiz, U. P. Valencia, España
César Sagaseta Millán, U. Cantabria, Santander, España	Márcio S. Almeida, COPPE, U. F. Rio de Janeiro, Brasil
Daniel Dias, U. Grenoble, França	Nilo Consoli, U. F. Rio Grande do Sul, Porto Alegre, Brasil
Eduardo Alonso Pérez de Ágreda, U. P. Cataluña, Barcelona, España	Paulo da Venda Oliveira, FCT, U. Coimbra, Portugal
Ennio Palmeira, U. Brasília, Brasil	Pedro Alves Costa, FEUP, Porto, Portugal
Emanuel Maranhã das Neves, IST, Lisboa, Portugal	Ricardo Oliveira, COBA/LNEC/U. Nova Lisboa, Portugal
Fernando Danziger, COPPE, U. F. Rio de Janeiro, Brasil	Tácio M.P. Campos, PUC-Rio, Rio de Janeiro, Brasil
Fernando Marinho, U. São Paulo, São Paulo, Brasil	Tarcísio B. Celestino, U. São Paulo, São Carlos, Brasil
Fernando Schnaid, U. F. Rio Grande do Sul, Porto Alegre, Brasil	Willy A. Lacerda, COPPE, U. F. Rio de Janeiro, Brasil

 SPG A/c LNEC Av. do Brasil, 101 1700-066 Lisboa, Portugal Tel.: (+351) 21 844 3859 Fax: (+351) 21 844 3021 E-mail: spg@lnec.pt http://www.spgeotecnia.pt	 ABMS Av. Queiroz Filho, 1700 – Torre A, Sala 106 05319-000 São Paulo, SP, Brasil Tel.: (+55 11) 3833 0023 E-mail: abms@abms.com.br http://www.abms.com.br	 SEMSIG CEDEX, Laboratorio de Geotecnia C/ Alfonso XII, 3 28014 Madrid, España Tel.: (+34) 91 335 7500 Fax: (+34) 91 335 7322 E-mail: info@semsig.org http://www.semsig.org
--	--	--

- 3 Abordagem data mining para a previsão da resistência à compressão uniaxial de misturas laboratoriais de solo-cimento
Data mining approach for unconfined compression strength prediction of laboratory soil cement mixtures
Joaquim Tinoco
Antônio Alberto S. Correia
Paulo J. Venda Oliveira
A. Gomes Correia
Luís J. L. Lemos
- 17 Métodos hiperbólico y Asaoka, otros usos. Caso del equilibrio de la humedad de suelos no saturados. Teoría
Hyperbolic and Asaoka's methods, other uses. Case of water content equilibrium of unsaturated soils. Theory.
Miriam Martín Ruiz
Enrique Asanza Izquierdo
- 29 Interveniência de reforço em lastro ferroviário sob carga de alto tráfego
Intervienience of reinforcement in railway ballast with load of high traffic
Luiz Gustavo Paulo Oran
Delma de Mattos Vidal
José Amaro de Souza Romero
Kledermón Garcia
Elizeu do Nascimento Filho
- 43 Comportamento térmico do solo: estudo experimental pelo Hot Wire Method e aplicação numérica
Soil thermal behaviour: Characterization by the Hot Wire Method and numerical application
Henrique Lopes
Ana Vieira
Sofia Soares
- 61 Estudo dos mecanismos de compactação em misturas entre solo arenoso e altos teores de emulsão asfáltica
Study of the compaction mechanism in mixtures of sandy soil and high asphalt emulsion contents
Fabiola Costa de Lima
Silvrano Adonias Dantas Neto

ABORDAGEM DATA MINING PARA A PREVISÃO DA RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO UNIAXIAL DE MISTURAS LABORATORIAIS DE SOLO-CIMENTO

Data mining approach for unconfined compression strength prediction of laboratory soil cement mixtures

Joaquim Tinoco^a, António Alberto S. Correia^b, Paulo J. Venda Oliveira^c, A. Gomes Correia^d, Luís J. L. Lemos^c.

^a ISISE /ALGORITMI Research Center, Universidade do Minho, Portugal.

^b CIEPQPF, Universidade de Coimbra, Portugal.

^c ISISE, Universidade de Coimbra, Portugal.

^d ISISE, Universidade do Minho, Portugal.

RESUMO – A previsão da resistência à compressão uniaxial (q_u) de misturas solo-cimento é de elevada importância durante a fase de projeto. Para a sua quantificação são realizados ensaios laboratoriais, os quais consomem muito tempo e recursos. Neste artigo é apresentada uma nova abordagem para avaliação da q_u ao longo do tempo tirando proveito das elevadas capacidades de aprendizagem das técnicas de *Inteligência Artificial* (IA). Três algoritmos de IA, nomeadamente as Redes Neurais Artificiais (RNAs), as Máquinas de Vetores de Suporte (MVSs) e Regressões Múltiplas (RMs), foram treinados utilizando uma base de dados composta por 444 registos contemplando solos não coesivos, coesivos e orgânicos, assim como diferentes ligantes, condições de mistura e tempos de cura. Os resultados obtidos evidenciam um desempenho promissor na previsão da q_u de misturas laboratoriais de solo-cimento, sendo o melhor desempenho conseguido através da média das previsões obtidas pelas MVSs e RNAs ($R^2 = 0,95$). Estes modelos reproduzem eficazmente os principais efeitos das variáveis de entrada, nomeadamente da razão água/cimento, teor em cimento, teor em matéria orgânica e tempo de cura, as quais são conhecidas como preponderantes no comportamento de misturas solo-cimento.

ABSTRACT – The prediction of the uniaxial compression strength (q_u) of soil cement mixtures is of utmost importance for design purposes. This is done traditionally by laboratory tests which is time and resources consuming. In this paper it is presented a new approach to assess q_u over time based on the high learning capabilities of Artificial Intelligence (AI) techniques. A database of 444 records, encompassing cohesionless to cohesive and organic soils, different binder types, mixture conditions and curing time, were used to train three models based on Artificial Neural Networks (ANNs), Support Vector Machines (SVMs) and Multiple Regression (MRs). The results show a promising performance in q_u prediction of laboratory soil cement mixtures, being the best results achieved with an average of SVMs and ANNs model ($R^2 = 0.95$). These models catch very well the major effects of the input variables water/cement ratio, cement content, organic matter content and curing time, which are known as key parameters in soil cement mixtures behavior.

Palavras Chave – Misturas solo-cimento, resistência à compressão uniaxial, data mining, análise de sensibilidade.

Keywords – Soil-cement mixtures, unconfined compression strength, data mining approach, sensitivity analysis.

E-mails: jtinoco@civil.uminho.pt (J. Tinoco), aalberto@dec.uc.pt (A. Correia), pjvo@dec.uc.pt (P. Oliveira), agc@civil.uminho.pt (A. Correia), llemos@dec.uc.pt (L. Lemos)

1 – INTRODUÇÃO

O estudo das propriedades mecânicas de misturas solo-cimento é uma tarefa de elevada complexidade devido ao elevado número de parâmetros envolvidos. Ao longo das últimas décadas, diversos estudos foram realizados seguindo diferentes abordagens mas tendo em comum o objetivo de melhor compreender o comportamento de misturas solo-cimento ao longo do tempo.

No que diz respeito à resistência à compressão uniaxial (q_u), esta é medida em ambiente laboratorial com recurso a ensaios que consomem tempo e recursos, os quais geralmente são muito limitados. Por conseguinte, é cada vez mais importante reduzir o número de ensaios laboratoriais ao mínimo necessário sem contudo comprometer a segurança e a confiança nos dados obtidos. A prática comum consiste em preparar (antes de iniciar os trabalhos de construção) e ensaiar algumas amostras laboratoriais tendo como objetivo simular as condições *in situ* (EuroSoilStab, 2001; EN 14679:2005). Estas amostras, preparadas com o mesmo solo, ligante e água a utilizar *in situ*, permitem obter uma ideia sobre como a mistura se irá comportar *in situ*. No entanto, estas amostras laboratoriais também representam um importante custo para o projeto, devendo este por conseguinte ser minimizado.

Este cenário sublinha a necessidade de, pelo menos a nível de projeto, dispor de ferramentas capazes de definir o melhor conjunto de parâmetros a utilizar durante o tratamento *in situ*. No entanto, devido ao elevado número de parâmetros que afetam o comportamento mecânico de misturas solo-cimento, nomeadamente da respetiva q_u , o recurso a análises estatísticas tradicionais tem-se mostrado incapaz de resolver este problema eficazmente (Croce e Flora, 2000; Kirsch e Sondermann, 2001), existindo apenas algumas expressões empíricas e limitadas a um domínio de aplicação bastante restrito (Liu et al., 2008).

Tendo como objetivo ultrapassar esta limitação, uma primeira e bem-sucedida tentativa foi recentemente realizada, tirando vantagem da elevada capacidade de aprendizagem das técnicas de *Inteligência Artificial* (IA) (Tinoco et al., 2011; Tinoco et al., 2014; Gomes Correia et al., 2014; Tinoco et al., 2016), as quais têm sido aplicadas com sucesso no passado em diferentes domínios do conhecimento (Domingos, 2012; Inbarani et al., 2018; Deepa e Ganesan, 2016), incluindo na área da engenharia civil (Liao et al., 2012; Emamgholizadeh et al., 2017).

Embora anteriormente se tenha conseguido um muito bom desempenho na previsão da q_u de misturas laboratoriais de solo-cimento (ver Fig. 1), existem algumas limitações que ainda precisam de ser ultrapassadas (Tinoco et al., 2014). Em particular, a dependência dos modelos das propriedades da mistura, nomeadamente na respetiva porosidade, é uma das principais limitações. Como se pode observar na Fig. 2, a qual representa a importância relativa de cada variável de entrada na previsão da q_u , a porosidade da mistura (medida apenas após a preparação da mistura) tem um peso superior a 15%. Por outro lado, é ainda de sublinhar o facto de os modelos apresentados na Fig. 1 terem sido treinados utilizando uma base de dados relativa a misturas solo-cimento com elevadas dosagens de cimento (Gomes Correia et al., 2014). Nesse sentido, e tendo como principal objetivo eliminar a dependência dos modelos das propriedades finais das misturas, nomeadamente da respetiva porosidade, bem como alargar o domínio de aplicabilidade dos mesmos, foram desenvolvidos novos modelos para previsão da q_u ao longo do tempo através da aplicação de ferramentas de IA. Assim, os modelos aqui apresentados, além de não considerarem nenhuma propriedade da mistura solo-cimento contemplam um teor em cimento mais amplo.

Assim, os modelos propostos para a previsão da q_u de misturas laboratoriais de solo-cimento ao longo do tempo, desenvolvidos através da aplicação de três algoritmos de IA, nomeadamente as Redes Neurais Artificiais (RNAs), as Máquinas de Vetores de Suporte (MVSs) e Regressões Múltiplas (RMs), têm como atributos dez variáveis referenciadas como influentes no comportamento mecânico de misturas solo-cimento. Entre elas há a destacar o teor em cimento utilizado na preparação da mistura, a granulometria do solo e o tipo de ligante.

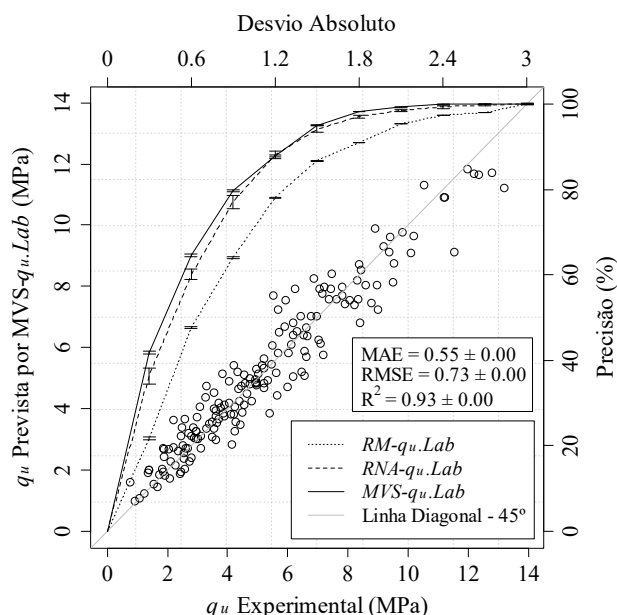
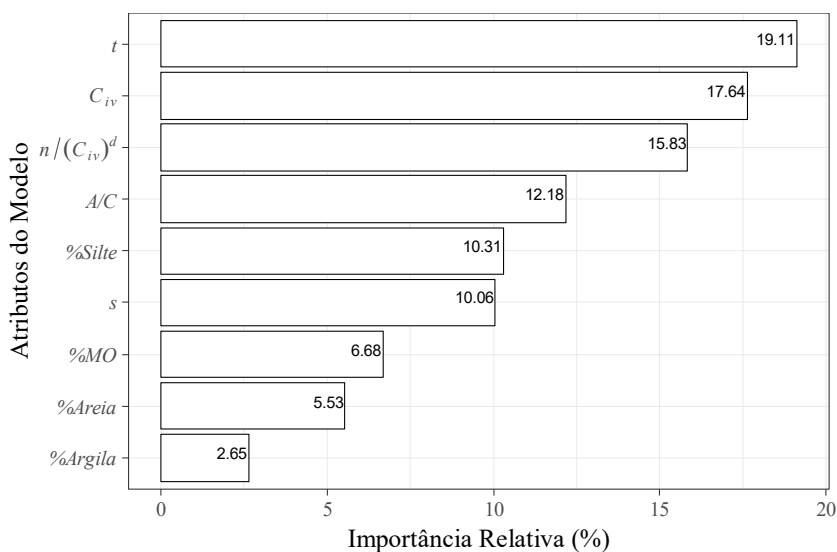


Fig. 1 – Desempenho dos modelos de IA na previsão da q_u (primeira tentativa) de misturas laboratoriais de solo-cimento (adaptado de Gomes Correia et al. (2014)).



t – tempo de cura (dias); C_{iv} – teor volumétrico de cimento; $n/(C_{iv})^d$ – relação entre a porosidade da mistura e o teor volumétrico de cimento; A/C – razão água/cimento; s – tipo de cimento; $\%Areia$ – teor em areia do solo; $\%Silte$ – teor em silte do solo; $\%Argila$ – teor em argila do solo; $\%MO$ – teor em matéria orgânica do solo

Fig. 2 – Importância relativa de cada variável de entrada na previsão da q_u de misturas laboratoriais de solo-cimento de acordo com o algoritmo MVSs (primeira tentativa) (adaptado de Tinoco et al. (2014)).

2 – METODOLOGIA

2.1 – Modelação

Para a modelação da q_u foram treinados três algoritmos de IA utilizando uma base previamente compilada e preparada, contendo resultados de testes à resistência à compressão uniaxial de misturas laboratoriais de solo-cimento bem como um conjunto de variáveis relacionadas com as características do solo e do ligante utilizados na preparação da mistura. Assim, foram treinados dois dos algoritmos de IA conhecidos pela sua elevada flexibilidade e capacidade de aprendizagem, nomeadamente as MVSs e as RNAs. Como base de comparação foi também treinada uma RM. Seguidamente é apresentada uma breve descrição dos algoritmos de IA aplicados, detalhando os respetivos parâmetros adotados.

Inicialmente desenvolvidas para problemas de classificação (Cortes e Vapnik, 1995), as MVSs foram posteriormente adaptadas a problemas de regressão através da introdução da função perda ε -insensitiva (Smola e Scholkopf, 2004). O principal objetivo das MVSs consiste em transformar os dados de entrada num espaço característico de elevada dimensão através de um mapeamento não-linear. As MVSs procuram posteriormente o melhor hiperplano de separação, relativo a um conjunto de vetores de suporte, nesse espaço característico. Esta transformação depende da função kernel adotada. O kernel Gaussiano é o mais popular por apresentar um menor número de parâmetros, tendo sido adaptado no presente estudo. Neste contexto, o desempenho das MVSs é afetado por três parâmetros: γ , o parâmetro do kernel; C , o parâmetro de penalização; e ε , a largura da zona ε -insensitiva (Gilan et al., 2012). Para auxiliar a escolha dos valores dos diferentes hiperparâmetros (γ , C e ε), foram adotadas as heurísticas propostas por Cherkassky e Ma (2004). Assim, para C foi adotado o valor de 3 e a largura da zona ε -insensitiva foi definida de acordo com $\varepsilon = \hat{\sigma}/\sqrt{N}$, onde $\hat{\sigma} = 1,5/N \cdot \sum_{i=1}^N (y_i - \hat{y}_i)^2$, y_i é o valor observado, $\hat{y}_i$ é o valor previsto pelo algoritmo dos 3-vizinhos próximos e N representa o número de registos da base de dados. O parâmetro kernel γ foi definido usando uma procura em grelha de $2^{\{-15; -11; -7; -3; 1\}}$, sob um esquema de validação cruzada interno.

Relativamente às RNAs, elas são um método de inteligência artificial que procura simular a estrutura do cérebro humano (ver Fig. 3) e do sistema nervoso através da sua arquitetura (Kenig et al., 2001). Este conceito foi inicialmente introduzido em 1943 por McCulloch and Pitts (1943), embora o seu uso tenha sido disseminado por Werbos (1974) através do desenvolvimento do algoritmo de *backpropagation*, o qual se veio a tornar numa ferramenta de referência no campo da previsão. As RNAs são uma técnica capaz de modelar problemas complexos e robustas a explorar dados com ruído. Neste estudo utilizou-se uma rede *multilayer perceptron* com conceções *feedforward* com uma única camada intermédia com H unidades de processamento. Uma vez que o desempenho da rede é sensível a H (balanço entre precisão e capacidade de generalização), adotou-se uma grelha de procura $\{0; 2; 4; 6; 8\}$ durante a fase de aprendizagem para encontrar o melhor valor de H . Esta grelha de procura utiliza apenas dados de treino, em que 70% são utilizados para propósitos de treino e 30% para validação. Depois de encontrar o melhor valor de H , a RNA é re-treinada com todos os dados de treino. Como função neuronal das unidades de processamento da camada intermédia foi utilizada a função logística $1/(1 + e^{-x})$.

Como base de comparação, neste trabalho foi também implementada uma RM. De acordo com o algoritmo de RMs as variáveis independentes são combinadas linearmente de forma a prever a variável dependente (Hastie et al., 2009). Esta natureza aditiva das RMs torna-as de fácil interpretação e amplamente utilizadas em tarefas de regressão. No entanto, uma das suas principais limitações prende-se com a sua ineficiência em modelar problemas de natureza não linear. Neste trabalho, foi adotada uma RM equivalente a uma RNA com zero camadas intermédias e uma função linear no nó de saída.

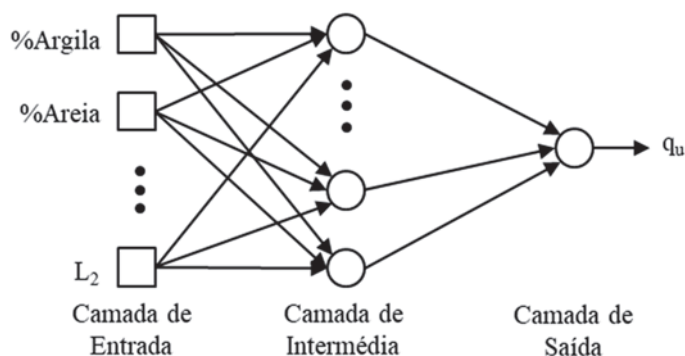


Fig. 3 – Arquitetura da RNA adotada no estudo da q_u de formulações laboratoriais de solo-cimento

O ambiente estatístico R (R Development Core Team, 2009), software livre e de código aberto, foi utilizado para conduzir todas as experiências realizadas. A biblioteca *rminer* (Cortez, 2010), a qual facilita a implementação de diversos algoritmos de IA, nomeadamente as MVSS e as RNAs, bem como diferentes abordagens de validação, em particular a validação cruzada implementada neste trabalho, foi também adotada neste estudo.

2.2 – Avaliação dos modelos

A avaliação dos modelos é uma etapa muito importante, permitindo medir o seu desempenho, quer em termos de precisão como também do ponto de visto de interpretação dos mesmos.

Para a comparação dos modelos e avaliação da respetiva precisão foram calculadas três métricas frequentemente utilizadas em problemas de regressão, nomeadamente (Hastie et al., 2009): Erro Médio Absoluto (MAE), Raiz do Erro Médio Quadrático (RMSE) e o coeficiente de determinação (R^2). Enquanto valores reduzidos de MAE e RMSE são indicadores de um modelo com elevado desempenho, o R^2 deverá aproximar-se tanto quanto possível do valor unitário. A principal diferença entre as métricas MAE e RMSE prende-se com o facto de a segunda ser mais sensível à existência de valores extremos uma vez que esta métrica utiliza o quadrado da diferença entre o valor experimental e o valor previsto pelo modelo. Quando comparado com a métrica MAE, o RMSE penaliza mais severamente modelos que apresentem maiores diferenças entre o valor experimental e o valor previsto, mesmo que isso aconteça apenas em alguns casos. Assim, estas duas métricas apresentam uma perspetiva diferente mas complementar sobre o desempenho dos modelos. Adicionalmente a estas três métricas, foram também calculadas as curvas REC (*Regression Errors Characteristic*) propostas por Bi and Bennett (2003). Estas curvas permitem uma avaliação visual e rápida do desempenho de diferentes modelos através da representação do erro tolerável (eixo dos xx) versus a percentagem de pontos calculados com um erro inferior ao tolerável (eixo dos yy).

A capacidade de generalização dos modelos é também um aspeto de elevada importância na avaliação de um modelo de IA. Nesse sentido, foi aplicada uma validação cruzada ($k - fold = 10$) (Hastie et al., 2009). Além disso todo o processo de treino foi repetido 5 vezes. De acordo com uma validação cruzada ($k-fold$) a totalidade dos dados são usados iterativamente para treino e para teste. Ou seja, a base de dados é dividida em k partes (onde k é um inteiro positivo), sendo o modelo treinado k vezes e ficando iterativamente uma das partes para propósitos de validação. No final, o melhor conjunto de parâmetros é utilizado para re-treinar o modelo utilizando a totalidade da base de dados.

Um outro aspeto muito importante num projeto de IA é conseguir perceber a forma como o modelo capturou o problema em estudo. Uma vez que os algoritmos de IA, em particular as RNAs

e as MVSs assentam em análises estatísticas complexas e são frequentemente designados por “black boxes”, são matematicamente muito complexos, havendo portanto a necessidade de “abrir” estes modelos de forma a facilitar a sua compreensão. Nesse sentido, Cortez e Embrechts (2013) propuseram uma nova abordagem de visualização através da realização de Análises de Sensibilidade (AS), as quais foram aplicadas neste trabalho. Uma AS é um método simples aplicado após a fase de treino medindo a resposta do modelo face à variação de um dos atributos do mesmo. Desta forma é possível quantificar a importância relativa de cada variável bem como o respetivo efeito médio na variável em estudo. Em particular, neste trabalho foi aplicado o método de Análise de Sensibilidade Global (ASG) (Cortez e Embrechts, 2013), o qual permite identificar interações entre as variáveis de entrada. Isto é conseguido através da variação em simultâneo de F atributos. Cada atributo toma diferentes valores (L níveis) dentro do respetivo intervalo de variação, e as restantes variáveis tomam um valor fixo de referência. Neste trabalho adotou-se o valor médio de cada variável como valor de referência e definiu-se $L=12$, o qual permite obter um nível de detalhe razoável dentro de um esforço computacional aceitável.

Utilizando os resultados da ASG é possível desenvolver diferentes técnicas de visualização. O gráfico de importância dos atributos mostra a influência relativa (R_a) de cada variável de entrada do modelo (de 0% a 100%). De acordo com a ASG, quanto maior for a variação produzida na variável de saída maior será a importância do respetivo atributo. Para medir este efeito, primeiro calculou-se a métrica gradiente (g_a) para cada um dos atributos. Depois, a importância relativa (R_a) foi calculada utilizando a seguinte equação:

$$R_a = g_a / \sum_{i=1}^I g_i \cdot 100(\%), \text{ onde } g_a = \sum_{j=2}^L |\hat{y}_{a,j} - \hat{y}_{a,j-1}| / (L - 1) \quad (1)$$

onde a é a variável de entrada em análise, I é o número de variáveis, $\hat{y}_{a,j}$ é a resposta da análise de sensibilidade para $x_{a,j}$.

2.3 – Base de dados

Para fins de treino e teste dos modelos, foi compilada e organizada uma base de dados com 444 registos. Estas amostras fazem parte de diferentes estudos laboratoriais desenvolvidos na Universidade do Minho e na Universidade de Coimbra, tendo dois objetivos principais. Por um lado, analisar a influência de diferentes variáveis no comportamento mecânico de misturas laboratoriais de “jet grouting” e/ou “cutter soil mixing” (Tinoco et al., 2011). Por outro lado, definir a dosagem adequada que permita a melhor estabilização do ponto de vista técnico, económico e ambiental (Correia, 2011; Correia et al., 2015; Venda Oliveira et al., 2012, 2013, 2014).

Os solos usados na preparação das amostras laboratoriais foram recolhidos de oito locais diferentes. Um dos locais é a zona do Baixo Mondego, entre Coimbra e Figueira da Foz (Portugal), variando desde solos coesivos a não-coesivos e orgânicos a não-orgânicos, apresentando diferentes propriedades geotécnicas. Foram testados catorze ligantes distintos, incluindo cimento Portland, escória, cinzas volantes, cal e sílica ativa, aplicados individualmente ou combinados (Correia, 2011). Relativamente aos restantes sete locais, todos os solos são de natureza argilosa, contendo diferente percentagens de areia, silte, argila e matéria orgânica (Tinoco et al., 2011). Estas amostras foram preparadas com cimento do tipo CEM I 42,5R (cimento Portland com 100% de clínquer) e CEM II 42,5R (cimento Portland composto com $\geq 65\%$ clínquer). Foram ainda preparadas algumas amostras com cimento pozolânico (CEM IV/A 35,5R com $\geq 20\%$ clínquer).

Como atributo dos modelos foi selecionado um conjunto de 10 variáveis. A escolha deste conjunto de variáveis teve em consideração o conhecimento empírico relacionado com o comportamento de misturas solo-cimento, nomeadamente no que diz respeito à evolução da q_u ao longo do tempo (Sariosseiri e Muhunthan, 2009; Lee et al., 2005; Lorenzo e Bergado, 2004; Chen e Wang, 2006). Foi ainda tido em consideração o feedback obtido durante o processo de aprendizagem

dos modelos. Seguidamente são apresentadas as 10 variáveis seleccionadas neste estudo para a previsão da q_u .

- Teor em argila do solo (%) - %*Argila*
- Teor em areia do solo (%) - %*Areia*
- Teor em silte do solo (%) - %*Silte*
- Teor em matéria orgânica do solo (%) - %*MO*
- Teor em água (%) - ω_0
- Teor em cimento (%) - a_w
- Razão Água/Cimento - A/C
- Idade da mistura (dias) - t
- Coeficiente relacionado com o tipo de ligante - C_s
- Coeficiente relacionado com o tipo de ligante secundário - L_2

O Quadro 1 resume as principais estatísticas das 10 variáveis de entrada, assim como da q_u , evidenciando o amplo intervalo dos valores do teor em cimento e da q_u . Na Fig. 4 é apresentada a matriz de correlação para todas as variáveis consideradas no estudo da q_u . Na diagonal são apresentados os histogramas para cada variável, abaixo da diagonal apresenta-se os gráficos de dispersão e na diagonal superior o respetivo coeficiente de correlação de *Pearson*. Da sua análise é perceptível a baixa correlação entre pares de variáveis, sendo a correlação mais significativa entre a %*Silte* e o ω_0 .

Quadro 1 – Resumo das principais estatísticas das variáveis de entrada e da q_u .

Variável	Mínimo	Máximo	Média	Desvio Padrão
% <i>Argila</i>	0,00	45,00	19,84	14,31
% <i>Areia</i>	0,00	99,00	22,97	22,10
% <i>Silte</i>	1,00	79,00	57,17	18,15
% <i>MO</i>	0,00	19,40	5,87	4,64
ω_0	7,17	113,05	64,96	24,48
a_w	3,00	284,32	55,42	69,21
A/C	0,63	10,91	3,30	2,05
t	3,00	90,00	25,71	15,42
C_s	0,20	0,31	0,22	0,06
L_2	0,00	1,00	0,61	0,49
q_u	0,10	13,19	2,77	2,72

3 – ANÁLISE E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

Nesta secção são apresentados os principais resultados do estudo realizado, visando o desenvolvimento de um modelo para a previsão da q_u de formulações laboratoriais de solo-cimento, através da aplicação de ferramentas estatísticas avançadas, usualmente conhecidas por IA.

O valor médio dos hyper-parâmetros e tempos de cálculo (acompanhados do respetivo intervalo de confiança a 95% de acordo com uma distribuição *t-student*) dos três modelos de IA treinados para a previsão da q_u de formulações laboratoriais de solo-cimento, daqui em diante designados por RNA.Lab, MVS.Lab e RM.Lab, são apresentados no Quadro 2.

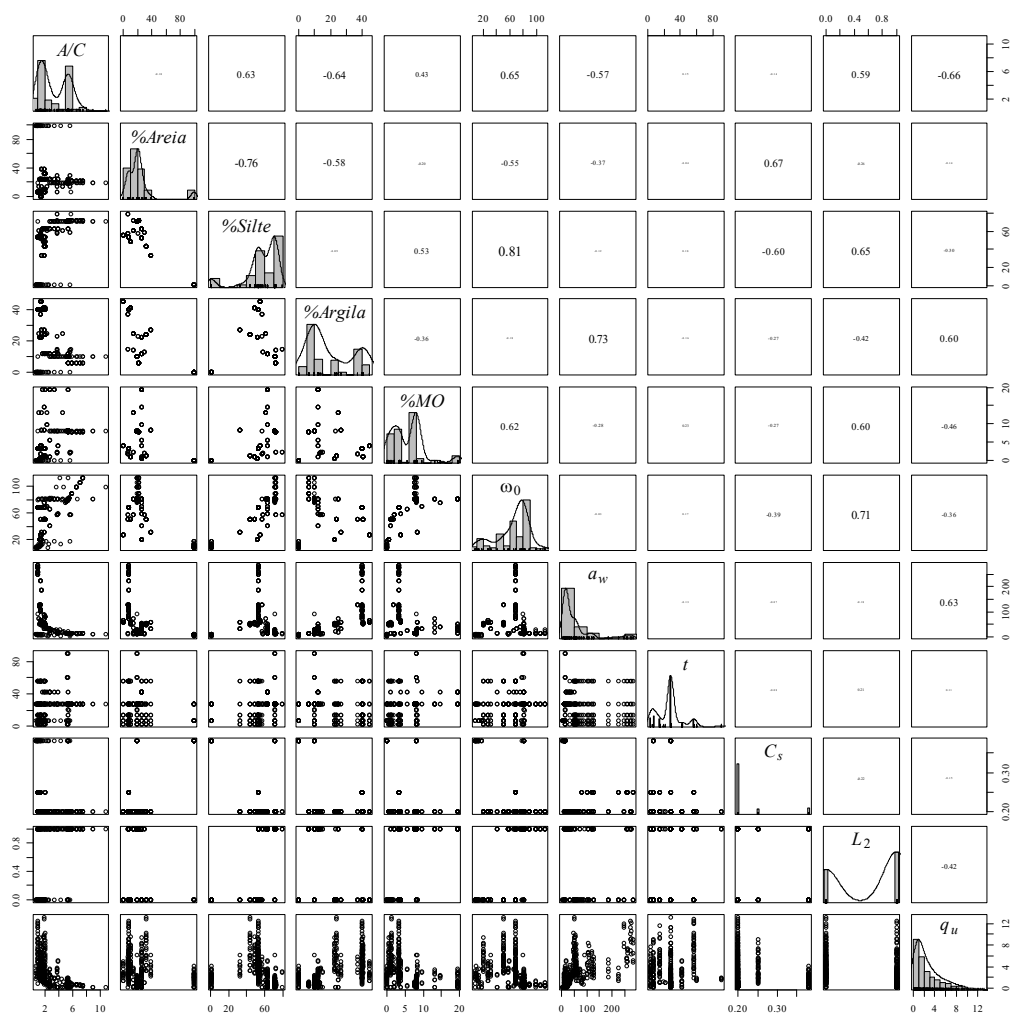


Fig. 4 – Matriz de correlação para todas as variáveis consideradas no estudo da q_u de formulações laboratoriais de solo-cimento

Quadro 2 – Hiper-parâmetros e tempos de cálculo de cada um dos modelos treinados (valor médio e respetivo intervalo de confiança a 95% de acordo com uma distribuição *t-student*).

Modelo	Hyper-parâmetro	Tempo (s)
RM.Lab	-	0,41±0,03
RNA.Lab	$H = 7 \pm 1$	17,18±0,45
MVS.Lab	$\gamma = 0,21 \pm 0,04; C = 3; \epsilon = -5,57 \pm 0,50$	9,63±0,28

Da análise do Quadro 3 observa-se um desempenho muito promissor na previsão da q_u de misturas laboratoriais de solo-cimento tendo por base o conjunto de variáveis selecionadas, o qual não contempla nenhuma informação sobre as propriedades da mistura. De facto, ambos os algoritmos RNAs e MVSs foram capazes de prever q_u com elevada precisão, conseguindo um $R^2 =$

0,94. Tendo como referência as métricas MAE ou RMSE, é possível observar que o modelo MVS.Lab é capaz de prever q_u com uma precisão ligeiramente superior ao modelo RNA.Lab. Como espectável, o modelo RM.Lab apresenta o pior desempenho com um $R^2 = 0,68$, o que é significativamente inferior em comparação com o MVS.Lab ou RNA.Lab.

Quadro 3 – Comparação do desempenho dos modelos tendo por base as métricas MAE, RMSE e R^2 (valor médio e respetivo intervalo de confiança a 95% de acordo com uma distribuição *t-student*, melhores valores a negrito).

Modelo	MAE	RMSE	R^2
<i>RM.Lab</i>	1,08±0,01	1,53±0,01	0,68±0,00
<i>RNA.Lab</i>	0,46±0,02	0,69±0,05	0,94±0,01
<i>MVS.Lab</i>	0,43±0,01	0,67±0,03	0,94±0,01
<i>MVS&RNA.Lab</i> (média)	0,41±0,01	0,61±0,02	0,95±0,00

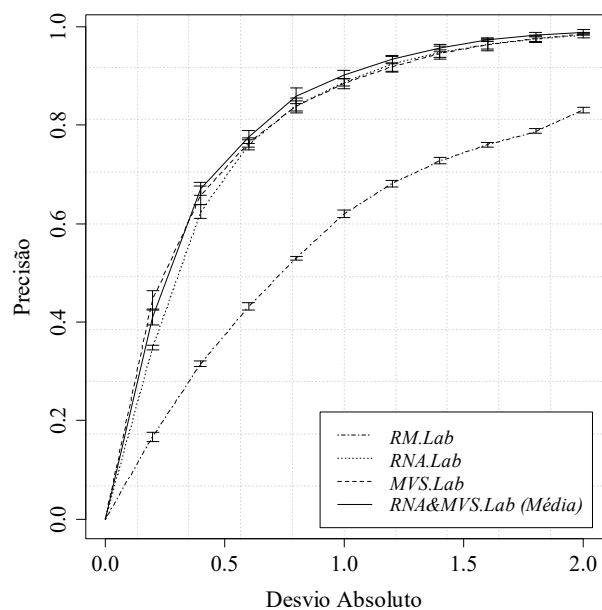


Fig. 5 – Comparação do desempenho dos modelos *MVS.Lab*, *RNA.Lab*, *RM.Lab* e *RNA&MVS.Lab Média* na previsão da q_u de misturas laboratoriais de solo-cimento com base nas curvas REC.

Embora os modelos MVS.Lab e RNA.Lab apresentem um desempenho muito elevado, observou-se que o mesmo pode ainda ser melhorado calculando a média das previsões de MVS.Lab e RNA.Lab (RNA&MVS.Lab). Com esta combinação de modelos consegue-se um $R^2 = 0,95$ e um RMSE muito perto de 0,61 MPa (ver Quadro 3). A Fig. 5 apresenta as curvas REC de cada modelo, evidenciando o desempenho ligeiramente superior na previsão da q_u através do cálculo da média das previsões dos modelos MVS.Lab e RNA.Lab. A Fig. 5 ilustra ainda a diferença significativa entre o desempenho do modelo RM.Lab quando comparado com os modelos MVS.Lab e RNA.Lab na previsão da q_u de misturas laboratoriais de solo-cimento.

O desempenho promissor de ambos os modelos RNA.Lab e MVS.Lab na previsão da q_u está claramente evidenciado na Fig. 6 (Fig. 6a e Fig. 6b), a qual apresenta a relação entre os valores experimentais e previstos. Como se pode observar, todos os pontos se encontram muito próximos da linha diagonal, a qual representa um modelo ideal/perfeito. A Fig. 6c apresenta a mesma relação,

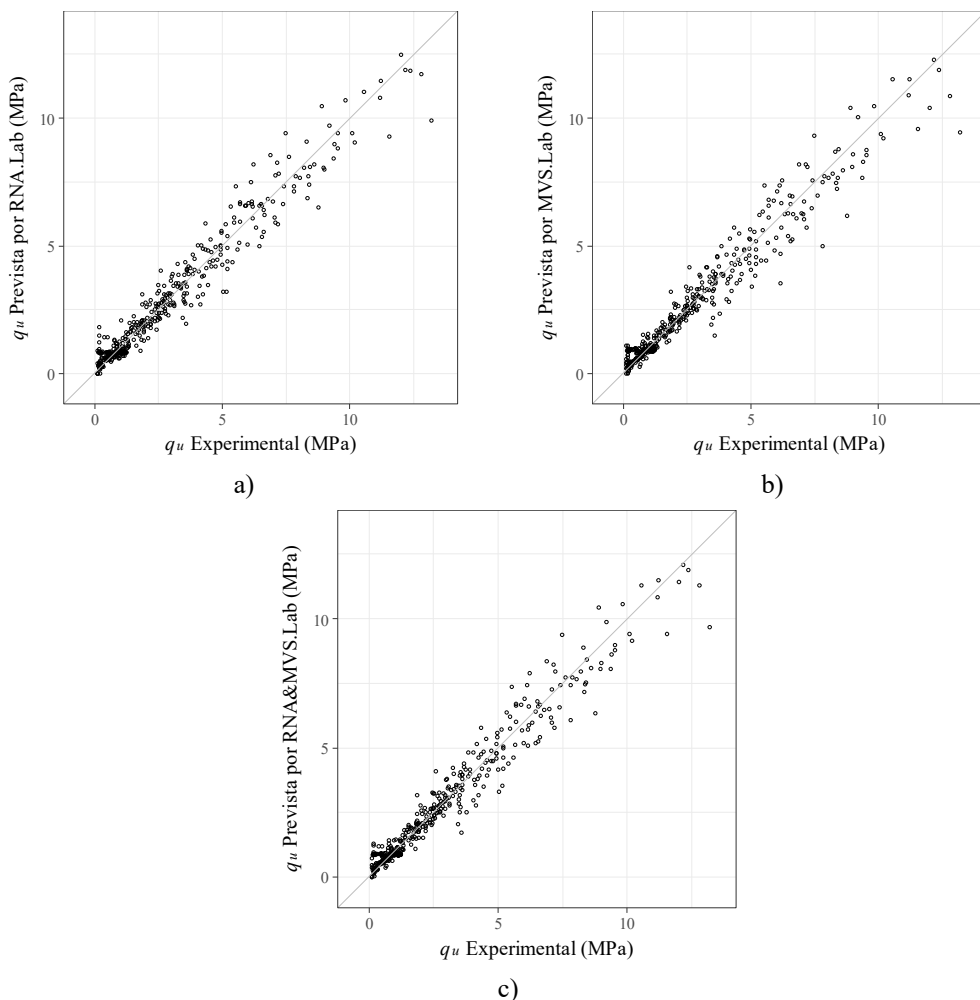


Fig. 6 – Relação entre os valores experimentais da q_u versus previstos pelos modelos: a) RNA.Lab; b) MVS.Lab; c) média de RNA.Lab e MVS.Lab.

mas considerando a média dos valores previstos pelos modelos RNA.Lab e MVS.Lab, ilustrando também neste caso o elevado desempenho conseguido.

Do ponto de vista de engenharia, complementarmente à precisão de um modelo é também muito importante perceber a forma como o mesmo modelou o problema, nomeadamente quando se está na presença de algoritmos de elevada complexidade matemática como as RNAs ou as MVSS. Nesse sentido, foi aplicada uma ASG (Cortez e Embrechts, 2013) sobre os modelos de forma a medir a influência dos atributos dos modelos na previsão da q_u . A Fig. 7 compara a importância relativa de cada variável de entrada dos modelos, mostrando que a relação A/C é a variável mais relevante na previsão da q_u de misturas laboratoriais de solo-cimento de acordo com os modelos RNA.Lab e MVS.Lab, com um peso relativo superior a 20%. As três variáveis chave seguintes são, de acordo com o modelo MVS.Lab, a_w , $\%MO$ e t . De acordo com o modelo RNA.Lab, o ranking é ligeiramente diferente, sendo ω_0 , $\%Silte$ e $\%Areia$ as três variáveis mais influentes logo a seguir à razão A/C . Comparando os dois modelos RNA.Lab e MVS.Lab, o último apresenta um ranking mais realista. De facto, entre as quatro variáveis mais relevantes, o modelo MVS.Lab inclui a influência do teor

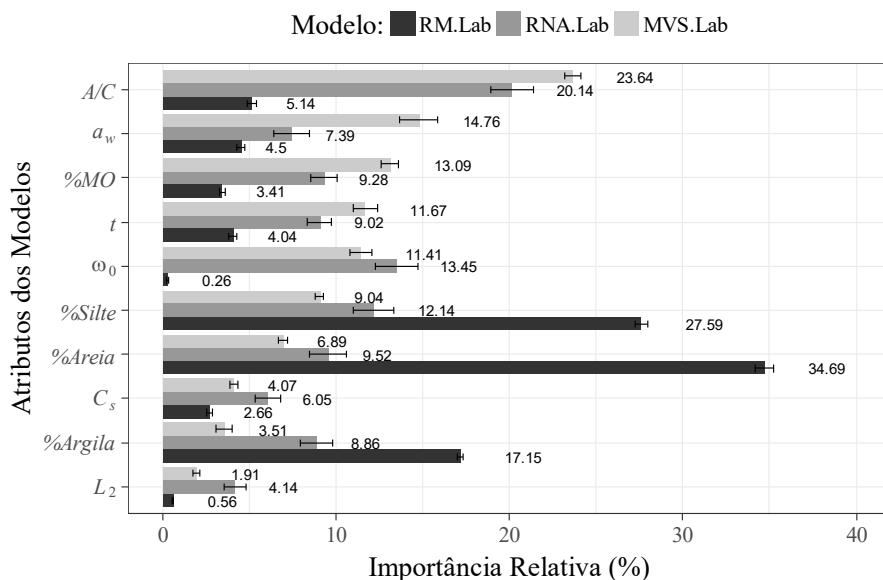


Fig. 7 – Comparação da importância relativa de cada variável de entrada dos modelos de acordo com uma ASG.

em água e do teor em cimento (A/C e a_w), o teor em matéria orgânica (%MO) e a idade da mistura (t), as quais são conhecidas por serem preponderantes no comportamento mecânico de misturas solo-cimento (Lorenzo e Bergado, 2004; Consoli et al., 2011; Horpibulsuk et al., 2011a, 2011b). De acordo com o modelo RNA.Lab, o efeito do teor em cimento é menos representativo (apenas presente na razão A/C) e o efeito do tempo de cura ocupa apenas sexta posição no ranking (menos de 10%). É sabido que a idade da mistura é uma das variáveis mais influentes no comportamento de misturas solo-cimento. Nesse sentido, considerando a precisão dos modelos bem como a importância relativa de cada variável, o modelo MVS.Lab parece ser a melhor escolha para a previsão da q_u ao longo do tempo de misturas laboratoriais de solo-cimento. Relativamente ao modelo RM.Lab, além do seu menor desempenho ($R^2 = 0,68$), a elevada influência das propriedades do solo e o reduzido efeito do tempo de cura e teor em cimento (cerca de 4%) parece muito pouco racional.

4 – CONSIDERAÇÕES FINAIS

Uma nova abordagem é proposta para a previsão da resistência à compressão uniaxial (q_u) de misturas laboratoriais de solo-cimento através da aplicação de ferramentas de *Inteligência Artificial* (IA). Os modelos propostos, suportados numa base de dados representativa constituída por 444 registos, são capazes de prever a q_u ao longo do tempo com uma precisão muito promissora ($R^2 = 0,95$). De sublinhar o facto de os modelos apenas considerarem informação disponível durante a fase de projeto, como por exemplo as propriedades do solo, teor em cimento e água, etc. Isto significa que o projetista dispõe de uma ferramenta capaz de estimar a q_u em diferentes cenários (formulações), não tendo necessidade de preparar/testar qualquer amostra. Isto permite uma melhor otimização dos recursos disponíveis e, consequentemente, uma maior eficiência económica.

Através da aplicação de uma Análise de Sensibilidade Global (ASG) foi possível identificar as variáveis mais influentes na previsão da q_u ao longo do tempo. Assim, observou-se que a razão Água/Cimento (A/C) é a variável mais relevante, seguida pelo teor em cimento, teor em matéria

orgânica do solo e idade da mistura. Deste modo conseguiu-se uma melhor compreensão dos modelos propostos, os quais devido à sua natureza são de elevada complexidade matemática.

Como observação final, é de salientar o importante contributo das técnicas de IA para ajudar a resolver e melhor compreender problemas de elevada complexidade, em particular as máquinas de vetores de suporte e as redes neuronais artificiais.

5 – AGRADECIMENTOS

Este trabalho foi suportado pela FCT – Fundação para a Ciência e a Tecnologia, no âmbito do projeto ISISE com a referência UID/ECI/04029/2013, dos projetos CIEPQPF com as referências EQB/UI0102/2014 e UID/CEC/00319/2013, assim como pela bolsa de pós-doutoramento com a referência SFRH/BPD/94792/2013. Este trabalho foi também parcialmente financiado por fundos FEDER através do *Competitivity Factors Operational Programme* – COMPETE e por fundos nacionais através da FCT no âmbito dos projetos com as referências POCI-01-0145-FEDER-007633, POCI-01-0145-FEDER-007043 e POCI-01-0145-FEDER-028382. Agradece-se igualmente o apoio concedido pela ACIV – Associação para o Desenvolvimento da Engenharia Civil.

6 – REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Bi, J.; Bennett, K. (2003). *Regression error characteristic curves*. Proceedings of the Twentieth International Conference on Machine Learning, pp. 43-50, AAAI Press, Washington, DC, USA.
- Chen, H.; Wang, Q. (2006). *The behaviour of organic matter in the process of soft soil stabilization using cement*. Bulletin of Engineering Geology and the Environment, Vol. 65, nº 4, pp. 445-448.
- Cherkassky, V.; Ma, Y. (2004). *Practical selection of svm parameters and noise estimation for svm regression*. Neural Networks, Vol. 17, nº 1, pp. 113-126.
- Consoli, N.C.; Rosa, D.A.; Cruz, R.C.; Dalla Rosa, A. (2011). *Water content, porosity and cement content as parameters controlling strength of artificially cemented silty soil*. Engineering Geology, Vol. 122, nº 3-4, pp. 328-333.
- Correia, A. (2011). *Applicability of deep mixing technique to the soft soil of baixo Mondego*. Ph.D. thesis, School of Engineering, University of Coimbra, Coimbra, Portugal.
- Correia, A.A.; Oliveira, P.J.V.; Custódio, D.G. (2015). *Effect of polypropylene fibres on the compressive and tensile strength of a soft soil, artificially stabilised with binders*. Geotextiles and Geomembranes, Vol. 43, nº 2, pp. 97-106.
- Cortes, C.; Vapnik, V. (1995). *Support vector networks*. Machine Learning, Vol. 20, nº 3, pp. 273-297.
- Cortez, P. (2010). *Data mining with neural networks and support vector machines using the r/rminer tool*. In: P. Perner (ed.) *Advances in Data Mining: Applications and Theoretical Aspects*, 10th Industrial Conference on Data Mining, pp. 572-583. LNAI 6171, Springer, Berlin, Germany.
- Cortez, P.; Embrechts, M. (2013). *Using sensitivity analysis and visualization techniques to open black box data mining models*. Information Sciences, Vol. 225, Mar, pp. 1-17.
- Croce, P.; Flora, A. (2000). *Analysis of single-fluid jet grouting*. Géotechnique, Vol. 50, Nº 6, pp. 739-48.

- Deepa, N.; Ganesan, K. (2016). *Multi-class classification using hybrid soft decision model for agriculture crop selection*. Neural Computing and Applications, pp. 1-14.
- Domingos, P. (2012). *A few useful things to know about machine learning*. Communications of the ACM, Vol. 55, nº 10, pp. 78-87.
- Emamgholizadeh, S.; Bahman, K.; Bateni, S.M.; Ghorbani, H.; Marofpoor, I.; Nielson, J.R. (2017). *Estimation of soil dispersivity using soft computing approaches*. Neural Computing and Applications, Vol. 28, nº 1, pp. 207-216.
- EN 14679:2005. *Execution of special geotechnical works - Deep mixing*. European Committee for Standardization.
- EuroSoilStab (2001). *Development of Design and Construction Methods to Stabilise Soft Organic Soils. Design Guide Soft Soil Stabilization*. Industrial & Materials Technologies Programme (BriteEuRam III), European Commission, Brussels, Belgium, CT97-0351, EC Project No. BE 96-3177.
- Gilan, S.; Bahrami Jovein, H.; Ramezaniapour, A. (2012). *Hybrid support vector regression – particle swarm optimization for prediction of compressive strength and rcpt of concretes containing metakaolin*. Construction and Building Materials, Vol. 34, Sep, pp. 321-329.
- Gomes Correia, A.; Tinoco, J.; Cortez, P. (2014). *Use of data mining in design of soil improvement by jet grouting*. In: D.T. et al. (ed.) Second International Conference on Information Technology in Geo-Engineering (ICITG 2014), pp. 43-63, IOS Press, Durham, UK.
- Hastie, T.; Tibshirani, R.; Friedman, J. (2009). *The Elements of Statistical Learning: Data Mining, Inference, and Prediction*. Second Edition, Springer-Verlag, New York.
- Horpibulsuk, S.; Rachan, R.; Suddeepong, A.; Chinkulkijniwat, A. (2011a). *Strength development in cement admixed bangkok clay: laboratory and field investigations*. Soils and Foundations, Vol. 51, nº 2, pp. 239-251.
- Horpibulsuk, S.; Rachan, R.; Suddeepong, A. (2011b). *Assessment of strength development in blended cement admixed bangkok clay*. Construction and Building Materials, Vol. 25, nº 4, pp. 1521-1531.
- Inbarani, H.H.; Kumar, S.U.; Azar, A.T.; Hassanien, A.E. (2018). *Hybrid rough-bijective soft set classification system*. Neural Computing and Applications, Vol. 29, nº 8, pp. 67-78.
- Kenig, S.; Ben-David, A.; Omer, M.; Sadeh, A. (2001). *Control of properties in injection molding by neural networks*. Engineering Applications of Artificial Intelligence, Vol. 14, nº 6, pp. 819-823.
- Kirsch, F.; Sondermann, W. (2001). *Ground improvement and its numerical analysis*. Proceedings of the international conference on soil mechanics and geotechnical engineering, Vol. 3. AA Balkema Publishers; pp. 1775–1778.
- Lee, F.H.; Lee, Y.; Chew, S.H.; Yong, K.Y. (2005). *Strength and modulus of marine clay-cement mixes*. Journal of geotechnical and geoenvironmental engineering, Vol. 131, nº 2, pp. 178-186.
- Liao, S.; Chu, P.; Hsiao, P. (2012). *Data mining techniques and applications. A decade review from 2000 to 2011*. Expert Systems with Applications, Vol.39, nº 12, pp. 11303-11311.
- Liu, Y.; Zhang, D.; Liu, Z.; Deng, Y. (2008). *Assessment of unconfined compressive strength of cement stabilized marine clay*. Marine Georesour Geotechnol; Vol.26, nº 1, pp. 19-35.

- Lorenzo, G.; Bergado, D. (2004). *Fundamental parameters of cement-admixed clay-new approach*. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, vol. 130, n° 10, pp. 1042-1050.
- McCulloch, W.S.; Pitts, W. (1943). *A logical calculus of the ideas immanent in nervous activity*. The bulletin of mathematical biophysics, Vol. 5, n° 4, pp. 115-133.
- R Development Core Team (2009). *R: A language and environment for statistical computing*. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria. Web site: <http://www.r-project.org/>
- Sariosseiri, F.; Muhunthan, B. (2009). *Effect of Cement Treatment on Geotechnical Properties of some Washington State Soils*. Engineering Geology, Vol. 104, n° 1-2, pp. 119-125.
- Smola, A.; Scholkopf, B. (2004). *A tutorial on support vector regression*. Statistics and Computing, Vol. 14, n° 3, pp. 199-222.
- Tinoco, J.; Alberto A.; Venda Oliveira, P.; Gomes Correia, A.; Lemos, L. (2016). *A data-driven approach for qu prediction of laboratory soil-cement mixtures*. Procedia Engineering, Vol. 143, pp. 566-573.
- Tinoco, J.; Gomes Correia, A.; Cortez, P. (2011). *Application of data mining techniques in the estimation of the uniaxial compressive strength of jet grouting columns over time*. Construction and Building Materials, Vol. 25, n°3, pp. 1257-1262.
- Tinoco, J.; Gomes Correia, A.; Cortez, P. (2014). *A novel approach to predicting young's modulus of jet grouting laboratory formulations over time using data mining techniques*. Engineering Geology, Vol. 169, Feb, pp. 50-60.
- Venda Oliveira, P.J.; Correia, A.A.; Garcia, M.R. (2012). *Effect of organic matter content and curing conditions on the creep behavior of an artificially stabilized soil*. Journal of materials in civil engineering, Vol. 24, n° 7, pp. 868-875.
- Venda Oliveira, P.J.; Correia, A.A.; Garcia, M.R. (2013). *Effect of stress level and binder composition on secondary compression of an artificially stabilized soil*. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, Vol. 139, n° 5, pp. 810-820.
- Venda Oliveira, P.J.; Correia, A.A.; Lopes, T.J. (2014). *Effect of organic matter content and binder quantity on the uniaxial creep behavior of an artificially stabilized soil*. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, Vol. 140, n° 9, pp. 04014053.
- Werbos, P. (1974). *Regression: New tools for prediction and analysis in the behavioral sciences*. Ph.D. thesis, Harvard University, Harvard, USA.

MÉTODOS HIPERBÓLICO Y ASAOKA, OTROS USOS. CASO DEL EQUILIBRIO DE LA HUMEDAD DE SUELOS NO SATURADOS. TEORÍA

Hyperbolic and Asaoka's methods, other uses. Case of water content equilibrium of unsaturated soils. Theory.

Miriam Martín Ruiz^a, Enrique Asanza Izquierdo^b

^a Escuela de Ingenieros de Caminos, Universidad Politécnica de Madrid, España.

^b Centro de Estudios y Experimentación de Obras Públicas (CEDEX), España.

RESUMEN – Este artículo muestra las posibilidades de aplicación del método hiperbólico y el de Asaoka en problemas geotécnicos de predicción. Una de ellas consiste en la predicción del valor final de la humedad si se ha determinado una serie de valores temporales de ésta durante el lento proceso de equilibrado a lo largo de la altura de una muestra de suelo al imponer una succión constante en su base. Se muestra que este proceso se rige por una ecuación análoga a la de consolidación (ámbito tradicional de ambos métodos). En rigor, ambos fenómenos obedecen a la ecuación de la difusión, si bien el parámetro físico clave de un flujo no saturado no es el coeficiente de consolidación, sino la difusividad hidráulica, $D(\theta)$, que no tiene por qué ser constante. Partiendo de este ejemplo, con el que la utilidad de los métodos antedichos se muestra en un segundo artículo, también se señala su aplicabilidad tanto en otros fenómenos de difusión, tales como problemas térmicos o transporte de contaminantes, como en ensayos de campo o laboratorio que miden procesos que tienden a una asíntota (carga de pilotes o ensayos presiométricos, por ejemplo). Para ello, este artículo ahonda en los fundamentos de los métodos hiperbólico y de Asaoka e indica los tipos de problemas geotécnicos en los que se ha empleado con éxito. Estos métodos predictivos, en definitiva, permiten reducir extraordinariamente los tiempos del ensayo, y lo que es más importante, reducir los riesgos de que un ensayo prolongado se malogre.

ABSTRACT – This paper shows the potential applications of the hyperbolic and Asaoka's method for prediction in geotechnical problems. One application refers to the prediction of the equilibrium water content when a number of this parameter have been previously measured over the slow process of along the height of the soil sample whose base is subjected to a certain suction. It is shown that this phenomenon is governed by an equation just as the consolidation equation (classical scope of both methods). Strictly speaking, both phenomena hold the equation of diffusion and that in the case of an unsaturated flow, the coefficient of consolidation is not the key physical parameter, but the hydraulic diffusivity, $D(\theta)$, that need not be constant. The previous example, with which the usefulness of the aforementioned methods are proven in a subsequent paper, helps to highlight their suitability for any other phenomena of diffusion, such as thermal problems and transport of contaminants, as well as for those laboratory or field tests that tend to asymptotic values (pile load or pressiometer tests, for instance). Thus, this paper insightfully addresses the principles of the hyperbolic and Asaoka's method and points out those geotechnical problems in which they have been successfully applied. Both predictive methods are ultimately meant to extraordinarily save time of testing, and most importantly, to reduce the failure likelihood of an extended test.

Palabras Clave – Predicción, suelos no saturados, humedad de equilibrio.

Keywords – Prediction, unsaturated soils, equilibrium water content.

E-mails: miriam.martinr@alumnos.upm.es (M. Martín Ruiz), enrique.asanza@cedex.es (E. Asanza Izquierdo)

1 – INTRODUCCIÓN

Algunos ensayos físicos consisten en provocar una perturbación a un sistema en equilibrio que da lugar un régimen transitorio hacia otro nuevo equilibrio, a fin de cuantificar la relación entre la intensidad de la perturbación y el cambio de algún parámetro entre los dos estados de equilibrio. Suele interesar medir también magnitudes que gobiernan el régimen transitorio. El ensayo de consolidación en edómetro constituye un paradigma de ello en geotecnia. Pese a tener la apariencia de un flujo de agua, en rigor, obedece a la ecuación de la difusión. El presente artículo aborda un ensayo geotécnico más inusual, gobernado básicamente por esa misma ecuación: el equilibrado de la humedad de una muestra al imponer en su base una succión constante. Estos ensayos se emplean para obtener la curva característica de un suelo, indispensable en los estudios de suelos no saturados.

Implementar técnicas de prognosis o predicción del asiento final en un edómetro convencional aporta pocas ventajas, por cuanto cada escalón de carga no suele demorarse mucho más de un día. En cualquier caso, se recurre a ellas para hallar el coeficiente de consolidación como alternativa a los métodos clásicos (Casagrande o Taylor), e incluso para discriminar la consolidación primaria de la secundaria. La prognosis de asientos de consolidación tiene mucha más relevancia en obra, por las incertidumbres ligadas al cambio de escala: los asientos diferidos pueden conducir a incumplimientos de los plazos de la obra o a la aparición de asientos inadmisibles una vez en servicio.

Los métodos de predicción son modelos matemáticos que hacen uso de una serie de registros tempranos del propio proceso para pronosticar su evolución. Se trata, además, de herramientas útiles para el denominado método observacional (Peck, 1969). Ha de hacerse notar que estas técnicas no son exclusivas de fenómenos que se atenúan con el tiempo (consolidación, fluencia clásica o por fracturación de granos en suelos sometidos a presiones muy altas, procesos geoquímicos, agotamiento de las sobrepresiones en los yacimientos o pozos, etc,...) sino que también tienen aplicación en problemas o experimentaciones tenso-deformacionales en medios plastificables como, por ejemplo, los registros de carga de pilotes (tanto axial como lateral), en cuyo entorno coexisten zonas pseudoelásticas y plásticas; así como en configuraciones con deformaciones de segundo orden, tales como compresiones en elementos muy esbeltos (pandeo de bulones o micropilotes) o cimentaciones fuertemente excéntricas en suelos blandos. Se comprende su utilidad especialmente en estos últimos casos, pues interesa pronosticar el valor de la asíntota, sin aproximar el experimento al umbral de fallo. Igualmente, en los procesos que se atenúan extraordinariamente con el tiempo, típico en fenómenos de difusión y térmicos, también son de gran ayuda.

El método hiperbólico, concretamente, se utiliza en geotecnia sobre todo para reproducir la pérdida de rigidez transversal (G) de los suelos a medida que aumenta su tensión desviadora, puesto que las curvas tensión-deformación axial de los triaxiales de suelos no preconsolidados parecen aproximarse a dicha forma (Kondner, 1963; Duncan y Chan, 1970). El modelo “hardening-soil” (Schanz, 1998), implementado en diversos códigos numéricos comerciales (PLAXIS y MIDAS GTS), incluye, entre otros elementos, este modelo. Por otra parte, el método hiperbólico también proporciona resultados satisfactorios para predecir el axil último de ensayos en pilotes (método de Chin, 1970, 1972). Fleming (1992) y Borel et al. (2004) depuraron dicho método para los casos en que las dos interacciones tenso-deformaciones (la punta y el fuste), que aisladamente se asemejan a hipérbolas, se solapan.

Aunque el método hiperbólico también se emplea para hacer prognosis de los asientos finales y del coeficiente de consolidación en laboratorio (Sridharan & Rao, 1981; Sridharan et al., 1987) y en obra (Tan et al., 1991; Tan, 1995), el método de Asaoka (1978), al menos en España, ha tenido mucha más difusión.

En el presente trabajo se ha comprobado que estos dos métodos también permiten pronosticar la evolución de la humedad en ensayos de succión. Este primer artículo expone las cuestiones

teóricas, en tanto que en un segundo artículo se mostrará la validación experimental. Para ello, se tomaron ensayos de tres suelos típicos de Madrid (Jucá, 1990; Asanza, 2009); ensayos en una roca tipo "creta" muy porosa, encaminados al estudio de las desproporcionadas subsidencias de los yacimientos petrolíferos de Ekofisk, en el del Mar del Norte (Priol et al., 2005); y por último, una reciente serie de ensayos de succión con el suelo arcillo-limoso resultante de la reducción a polvo de testigos de lutitas de la formación Marcellus, (cuenca de los Apalaches, EE.UU.). Estos últimos ensayos forman parte de una línea de colaboración entre el Departamento de Ingeniería y Morfología del Terreno de la ETS Caminos de la UPM y el Laboratorio de Geotecnia del CEDEX para caracterizar lutitas generadoras de gas (shale gas) de muy baja porosidad ($n \approx 0,05-0,12$).

2 – MARCO TEÓRICO

2.1 – Succión; curva característica

Una muestra de suelo tendrá tanta más avidez por tomar agua de su entorno cuanto más seca esté. Aceptando la fórmula de la capilaridad (la ascensión del agua por un capilar es inversamente proporcional a su diámetro), serán su poros más finos los que la manifiesten de modo más intenso. Tal avidez por agua puede expresarse formalmente como un potencial, esto es, una energía por unidad de masa de agua, que en términos más prácticos, es convertible en metros (negativos) de columna de agua, y en definitiva, en una succión (ψ). Si esos poros más finos logran captar agua del entorno y saturarse, pese a que los inmediatamente menos finos tengan algo menos de avidez, la humedad de la muestra irá aumentando hasta que la succión (avidez) de los poros más pequeños aún no saturados se equilibre con la succión del agua del ambiente exterior. En física de suelos, y por ende, en mecánica de suelos no saturados, es preferible trabajar con la humedad volumétrica (θ), que se define como el volumen de agua por unidad de volumen total de muestra.

Se denomina curva característica, de retención o curva succión-humedad a la relación entre la succión impuesta a una muestra (ψ) y la humedad volumétrica (θ) alcanza en el equilibrio. Puede formularse como:

$$\theta = \theta(\psi), \text{ o bien } \psi = \psi(\theta) \quad (1)$$

De momento, se omitirá el hecho de que se trata de una relación histerética, con lo que pierde la biunivocidad si se suceden ciclos de humectación y de desecación.

Teóricamente, la curva característica tendría que ser totalmente equivalente a la curva de distribución de poros obtenida con un porosímetro, máxime si se concibe el suelo como una red sencilla de capilares. Sin embargo, dada la complejidad de la verdadera interacción físico-química entre el suelo y el agua (o algún otro fluido, como los procedentes de hidrocarburos), sólo hay similitud en los rangos más bajos de succión, en los que predominan las fuerzas puramente capilares. Romero y Simms (2008) señalan otros motivos de las divergencias.

Se llama *capacidad de succión* a la pérdida de humedad volumétrica al variar en un orden de magnitud la succión. Se corresponde con la pendiente de la curva característica en un gráfico semilogarítmico. Dicho valor está fuertemente correlacionado con el límite líquido (Burland, 1990; Jucá, 1990; Ho et al., 1992; Marinho, 1994; Jucá y Frydman, 1996). Otra definición muy afín es la *capacidad de humectación específica*, que es la pendiente natural de la curva característica:

$$C(\theta) = \frac{d\theta}{d\psi} \quad (2)$$

La Figura 1 ilustra los conceptos vistos en este apartado.

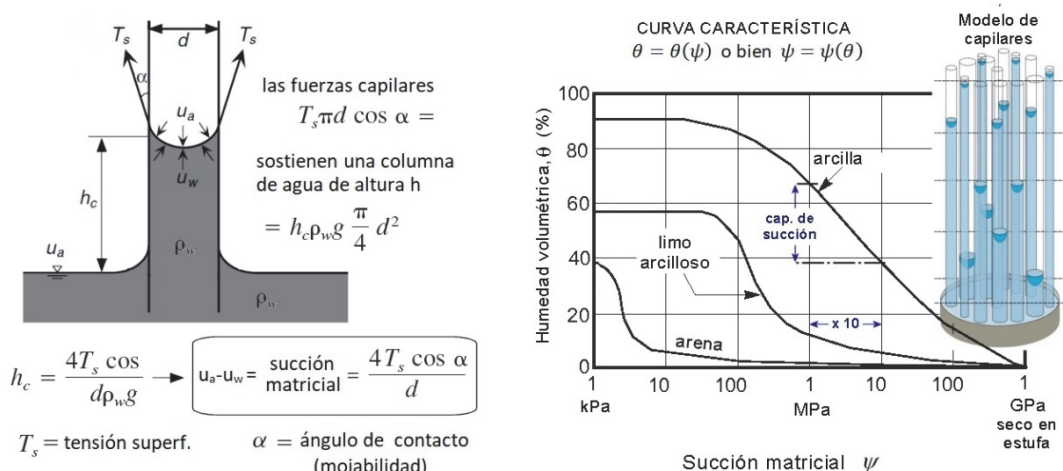


Fig. 1 – Modelo capilar aplicado a suelos (izq) y curva característica (der).

2.2 – Conductividad hidráulica

En un suelo no saturado ya no rige la permeabilidad como escalar, sino como una función, denominada *conductividad hidráulica*. Esto se debe a que cuando el suelo deja de estar saturado, su red de poros comienza a perder conectividad hidráulica, esto es, varía con el grado de saturación $k = k(S_R)$. Alternativamente, puede expresarse en función de la succión, $k = k(\psi)$ o de la humedad volumétrica, $k = k(\theta)$. Como quiera que $\theta = n \cdot S_R$, donde n es la porosidad, si se conoce el incremento de volumen de la muestra debido a los cambios de humedad, resulta inmediato la conversión entre estas tres modalidades (Asanza, 2009).

Dada la extremada dificultad de realización de ensayos específicos de conductividad hidráulica, los investigadores han propuesto diversas funciones analíticas, todas basadas de algún modo en la integración de la curva característica, entendiendo la red porosa como capilares (modelo algo dudoso en arcillas). Las más difundidas en geomecánica son la de Brooks and Corey (1964), la de van Genuchten (1980) y la de Fredlund y Xing (1994). Puede aceptarse, en primera aproximación, que la conductividad hidráulica depende del cubo del grado de saturación (Brutsaert, 1963; Fredlund & Rahardjo, 1993; Alonso et al., 2008; Lu y Likos, 2004; Tarantino, 2010). Esto es:

$$k_{no\ sat} \approx k_{sat} \cdot (S_R^*)^3 \quad (3)$$

donde S_R^* es el grado de saturación eficaz, esto es, descontando el agua más intensamente retenida por el suelo, sin conectividad (agua residual o pendular). En ocasiones tal descuento también se aplica a la humedad volumétrica.

2.3 – Extensión a flujos no saturados. Información experimental

Para que haya certeza de que una muestra sometida a una cierta succión matricial haya alcanzado prácticamente su humedad de equilibrio, el ensayo suele prolongarse varias semanas. Si se trata de una muestra sometida a una succión total (matricial más osmótica), transferida desde la fuente de succión a través de la humedad del aire, los tiempos de equilibrio pueden aumentar un orden de magnitud.

El presente artículo prueba la utilidad del método hiperbólico y el de Asaoka para estimar la humedad de equilibrio (asintótica) de la muestra si se ha determinado la humedad en diferentes momentos del periodo de equilibrado. Se explicará también cómo estas técnicas contribuyen a verificar la bondad de la función conductividad hidráulica $k = k(\theta)$, puesto que como ya se ha explicado, no es experimental, sino teórica, mediante procedimientos de integración de la curva característica, $\theta = \theta(\psi)$, que sí es experimental.

Otro uso adicional de los métodos de predicción es la posibilidad de detección y corrección tanto de posibles procesos de desecación por evaporación a altas succiones o condensación (Romero, 1999; Villar, 2000; Vanapalli et al., 2008), como de errores de manipulación de la muestra.

3 – PLANTEAMIENTO FORMAL. LA ECUACIÓN DE RICHARDS (1931)

Al imponer en laboratorio una succión (ψ) en la base de una muestra homogénea (su espesor es irrelevante a efectos de energía potencial: $h=z+\psi \cong \psi$), se establece un flujo no saturado transitorio cuyo caudal por unidad de superficie (ascendente o descendente, según se imponga una succión menor o mayor a la inicial de la muestra) viene dado por la ecuación de Darcy:

$$q = -k(\psi) \cdot \frac{dh}{dz} \cong -k(\psi) \cdot \frac{d\psi}{dz} \quad (4)$$

Como se ve, ha de generalizarse la ecuación de Darcy con la función de conductividad hidráulica. Por otra parte, el flujo vertical establecido ha de satisfacer la ecuación de continuidad, esto es, que la variación de humedad en un elemento unitario, sea igual al balance de caudal vertical:

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = -\frac{\partial q}{\partial z} \quad (5)$$

Luego, introduciendo la ecuación de Darcy (4) generalizada en la ecuación de la continuidad (5), resulta:

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z} \left[k(\psi) \cdot \frac{\partial \psi}{\partial z} \right] \quad (6a)$$

La expresión (6a) se conoce como la ecuación de Richards (1931). Adviértase que el tiempo (t) y la altura (z) del punto considerado de la muestra son variables independientes, en tanto que la humedad volumétrica (θ) y la succión (ψ) están ligadas a través de la ecuación (1), la curva característica. Así, la conductividad hidráulica puede expresarse en función de la humedad volumétrica, $k = k(\theta)$. En virtud de ello, esta expresión puede reescribirse sólo en función de la humedad volumétrica:

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z} \left[k(\theta) \cdot \frac{\partial \psi}{\partial \theta} \cdot \frac{\partial \theta}{\partial z} \right] \quad (6b)$$

Haciendo uso de la definición de capacidad de humectación específica (2), la ecuación de Richards adopta una estructura que facilita su tratamiento matemático:

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z} \left[\frac{k(\theta)}{C(\theta)} \cdot \frac{\partial \theta}{\partial z} \right] = \frac{d\partial}{dz} \left[D(\theta) \cdot \frac{\partial \theta}{\partial z} \right] \quad (7)$$

Si, por sencillez, se tomará $D(\theta)$ como una constante, la estructura de la ecuación diferencial de Richards (1931) sería igual a la de la consolidación, esto es, la de un proceso de difusión (como la ecuación del calor o la ecuación de Fick), por lo que el cociente de la conductividad hidráulica entre la capacidad de humectación específica:

$$\frac{k(\theta)}{C(\theta)} = D(\theta) \quad (8)$$

sería un parámetro de difusión, que se denomina difusividad hidráulica, $D(\theta)$. En este caso, como no tiene por qué ser una constante, sólo se ha encontrado solución analítica con algunas expresiones sencillas de $D(\theta)$. El grado de variación de $D(\theta)$ con la humedad y sus leyes de ajuste, así como algunas soluciones analíticas pueden encontrarse en los tratados de física del suelo (Hillel, 1998; Bear y Chen, 2010). De modo orientativo, en condiciones de cuasi-saturación los investigadores la cifran en $D \approx 1 \text{ m}^2/\text{día}$, en tanto que para el punto de marchitez (succión: $\psi \approx 1,5 \text{ MPa}$), en $D \approx 10^{-3}$ a $10^{-4} \text{ m}^2/\text{día}$.

No obstante, aparte de los códigos comerciales que incorporan módulos transitorios con flujo no saturado (SEEP, PLAXIS, etc.), existen otros códigos numéricos gratuitos para la resolución de este problema, como por ejemplo el Hydrus-1D, desarrollado por Simunek et al. (2005). Este código también resuelve otros problemas de difusión antedichos: el de transporte de calor y de solutos.

4 – MÉTODOS DE PREDICCIÓN

4.1 – El método hiperbólico

Cuando la curva que relaciona dos variables del proceso físico que se estudia se asemeja a una hipérbola puede aprovecharse una propiedad de las hipérbolas equiláteras. Para demostrarla ha de partirse de una hipérbola cuyos ejes de referencia sean sus asíntotas, que se denominarán (x', y') . Así, basta con trasladar estos ejes y cambiar el signo a uno de ellos, siendo las nuevas asíntotas los parámetros alfa (α) y beta (β), como muestra la Figura 2a. Como se ve en ella, mediante un sencillo cambio de variable ($v=x/y$), los puntos de la hipérbola se pueden transformar en una recta. Merced a ello, si se tiene una serie de datos tempranos (x_i, y_i) de un experimento, al graficarse como $(x_i; v_i=x_i/y_i)$, la pendiente de la recta es la inversa de la asíntota buscada (Fig. 2b). Según el caso geotécnico que se estudie, dicha asíntota puede ser:

- la carga última de un pilote en función de una serie de asientos registrados (valores x_i);
- la carga última (fallo) por pandeo de un micropilote u otro elemento esbelto, en función de las deflexiones medidas;
- el asiento final a tiempo infinito de un proceso de consolidación o de fluencia;
- la humedad final de una muestra sometida a una cierta succión, que es el caso que se contrastará.

La ecuación que relaciona los dos parámetros del fenómeno no tienen por qué ajustarse a una hipérbola en todo su dominio. Concretamente, la ecuación teórica que rige la consolidación unidimensional (Terzaghi-Fröhlich) se aproxima realmente bien sólo entre el 60 y el 90 % de la consolidación global. Tales singularidades gráficas se aprovechan para obtener el coeficiente de consolidación. La Figura 2c muestra la transformación de la ecuación adimensional de la consolidación con el procedimiento de la hipérbola; si se dispone de diversos registros de asientos temporales, tras identificar al menos el valor del 60 %, por semejanza y tras el pertinente cambio de escala, puede hallarse el coeficiente de consolidación. Por total analogía, si los registros de humedad de un ensayo de equilibrado de la succión se ajustaran a una hipérbola, podría entenderse

que la difusividad hidráulica, $D(\theta)$, apenas variaría con la humedad, de modo que podrían hacerse algunas aproximaciones sobre el cociente entre la conductividad hidráulica y la capacidad de humectación específica.

Expresión canónica de la hipérbola equilátera: $xy=cte$

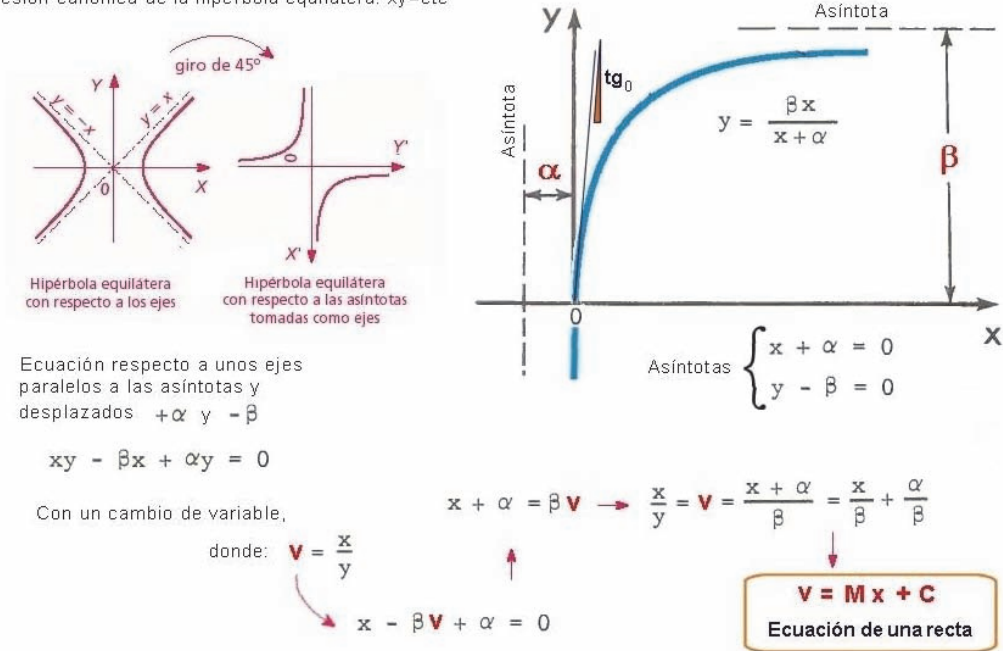


Fig. 2a – Ecuación de la hipérbola y su transformación a una recta

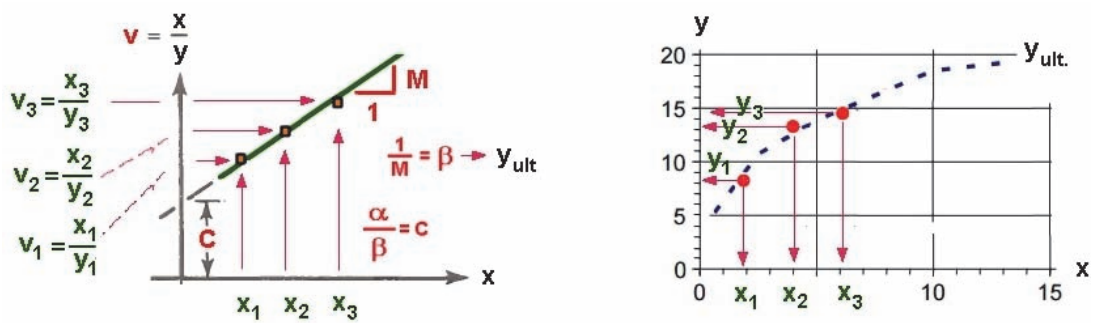


Fig. 2b – Procedimiento gráfico para obtener el valor asintótico (inversa de la pendiente)

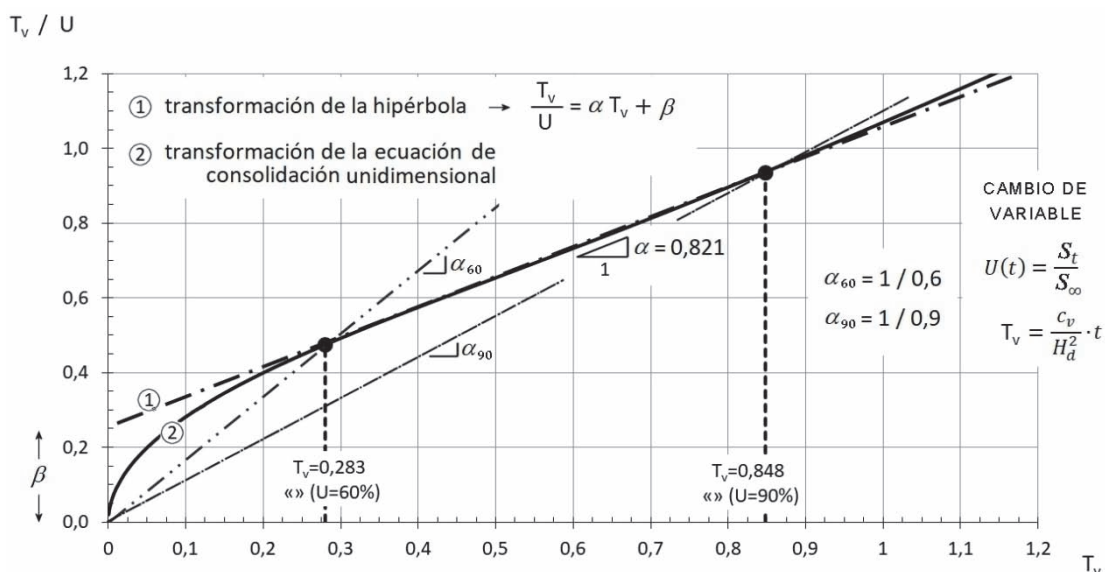


Fig. 2c – Transformación de la hipérbola con la ecuación de la consolidación unidimensional.

4.2 – El método de Asaoka

El método de Asaoka (1978) se concibió para la predicción de asentos y, por añadidura, del coeficiente de consolidación. Aunque, a diferencia del método hiperbólico, no se han encontrado referencias de adaptación de este método a otros casos predictivos en Geotecnia, se cree que hay margen para usarlo también en problemas que obedezcan a leyes de atenuación.

En última instancia, el método se sustenta en una propiedad de funciones del tipo:

$$f(t) = \lambda \cdot (1 - \xi \cdot e^{-\varepsilon \cdot t}) \quad (9)$$

donde $\lambda, \xi, \varepsilon$ son constantes (con $\varepsilon > 0$)

Dicha propiedad se enuncia del siguiente modo: la serie discreta de valores $f(t_i)$, donde los t_i están equiespaciados, cumple la siguiente relación de sucesión (por sencillez de notación, $f(t_i)$ se escribirá f_i):

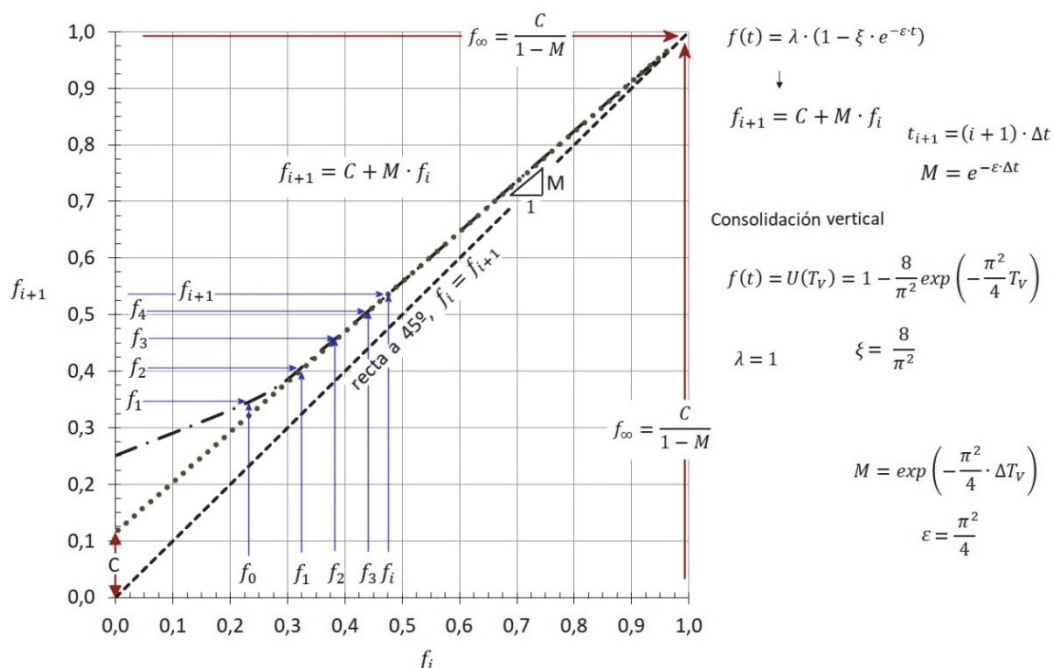
$$f_{i+1} = C + M \cdot f_i \quad (10)$$

siendo $t_{i+1} = t_i + \Delta t = (i + 1) \cdot \Delta t$

donde:

$$M = e^{-\varepsilon \cdot \Delta t} \quad (11)$$

Lo anterior equivale a decir en términos gráficos que la serie de puntos $(f_0; f_1)$ $(f_1; f_2)$, $(f_2; f_3)$, $(f_3; f_4) \dots (f_i; f_{i+1})$, pertenece a una línea recta en unos ejes cartesianos, cuya ordenada en el origen y pendiente son C y M . Como la función $f(t)$ es asintótica, precisamente los valores f_i y f_{i+1} tenderán a igualarse a medida que crecen, con lo que el valor final en la construcción gráfica corresponderá a la intersección con la recta a 45° , esto es, $f_i = f_{i+1}$. Lógicamente, la variable t no tiene por qué ser necesariamente el tiempo. La Figura 3 ilustra estas ideas.



5 – CONCLUSIONES

En este artículo se ha ahondado en los fundamentos de los dos métodos de predicción más empleados en los problemas de consolidación. En concreto se ha justificado, desde un punto de vista teórico, su validez también para el caso de la determinación de la humedad de equilibrio en los ensayos de laboratorio para determinar la curva succión-humedad. Su utilidad en este caso radica en que permiten estimar la humedad final reduciendo extraordinariamente el tiempo de ensayo (generalmente, varias semanas), y lo que es más importante, minimizar los riesgos de que éste se malogre, pues estos aumentan mucho en ensayos prolongados.

Asimismo, se ha mostrado que tanto estos procesos de flujos no saturados como los de consolidación obedecen a las leyes de la difusión. Tan sólo difieren en que el parámetro que gobierna el equilibrio de la humedad, en lugar de ser el coeficiente de consolidación, es la difusividad hidráulica, $D(\theta)$, que no es necesariamente constante. Así, estos métodos son plenamente válidos para predicciones de ensayos ligados a procesos difusivos o equivalentes, como por ejemplo la dispersión de contaminantes y procesos térmicos.

Teniendo presente los fundamentos de ambos métodos, se vislumbra también su utilidad en otros problemas geotécnicos, tales como para la estimación de la presión límite en ensayos presiométricos, la presión intersticial asintótica en los ensayos de disipación con CPTu e incluso para la extrapolación de asientos por fluencia. En un segundo artículo se probará la utilidad de los dos métodos mediante su aplicación en los 4 trabajos experimentales referidos en el apartado 1.

6 – REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Alonso, E.; Pinyol, N.; Olivella, S. (2008). *Slope stability under rapid drawdown conditions*. Water Resources Research, 44, nº 5.
- Asanza, E. (2009). *Determinación de las características de fricción en el contacto suelo-geotextil a diferentes succiones, mediante equipos de laboratorio singulares*. Tesis Doctoral, Universidad Politécnica de Madrid.
- Asaoka A. (1978). *Observational procedure of settlement prediction*. Soils and Foundations, 18, nº 4, pp. 87–101.
- Bear, J.; Chen, A.H.-D. (2010). *Modelling ground water flow and contaminant transport*, Springer.
- Borel, S.M.; Bustamante, M.; Gianeselli, L. (2004). *An appraisal of the Chin Method based on 50 instrumented pile tests*. Ground Engineering, January.
- Brooks, R.H.; Corey, A.T. (1964). *Hydraulic properties of porous media*. Hydrol. Paper nº. 3, Colorado State Univ., Fort Collins.
- Brutsaert, W. (1963). *On pore size distribution and relative permeabilities of porous medium*. J. Geophysical Research, 68, nº 8, pp. 2233–2235.
- Burland, J.B. (1990). *30th Rankine lecture: On the compressibility and shear strength of natural clays*. Geotechnique, Vol. 40, pp.327-378.
- Chin, F. K. (1970). *Estimation of the ultimate load of piles from tests not carried to failure*. Proc. of South East Asian Conference on Soil Engineering.
- Chin, F.K. (1972). *The inverse slope as a prediction of ultimate bearing capacity of piles*. Proc. 3rd Southeast Asian Conference on Soil Engineering, pp. 83–91.
- Duncan, J. M.; Chang, C. Y. (1970). *Nonlinear analysis of stress and strain in soils*. J. of Soil Mechanics & Foundations Division, 96, nº 5, pp. 1629–1653.

- Fleming, W.G.K. (1992). *A new method for single pile settlement prediction and analysis*. Geotechnique, 42, nº 3, pp. 411–425.
- Fredlund, D.G.; Rahardjo, H. (1993). *Soil Mechanics for unsaturated soils*, John Wiley & Sons.
- Fredlund, D.G.; Xing, A. (1994). *Equations for the soil-water characteristic curve*. Canadian Geotechnical Journal, 31, nº 3, pp. 521–532.
- Hillel, D. (1998). *Environmental Soil Physics*, Academic Press.
- Ho, D.Y.F.; Fredlund, D.G.; Rahardjo, H. (1992). *Volume change indices during loading and unloading of an unsaturated soil*. Canadian Geotechnical Journal, 29, nº 2, pp. 195–207.
- Jucá, F.T. (1990). *Comportamiento de los suelos parcialmente saturados bajo succión controlada*. Tesis Doctoral, Universidad Politécnica de Madrid.
- Jucá, J.F.T.; Frydman, S. (1996). *Experimental techniques*, Proc. 1st International Conference on Unsaturated Soils, Paris, pp. 1257–1292.
- Kondner, R.L. (1963). *Hyperbolic stress-strain response: cohesive soils*. J. of the Soil Mechanics & Foundations Division, ASCE, 89, nº 1, pp. 115–143.
- Lu, N.; Likos, W.J. (2004). *Unsaturated Soil Mechanics*, John Wiley & Sons.
- Marinho, F.A.M. (1994). *Shrinkage behavior of some plastic clays*. Ph.D. Thesis, Imperial College, Univ. of London.
- Peck, R.B. (1969). *Advantages and Limitations of the Observational Method in Applied Soil Mechanics*. Géotechnique, 19, nº 2, pp. 171–187.
- Priol, G.; De Gennaro, V.; Delage, P.; Cui, Y.-J. (2005). *On the suction and the time dependent behaviour of reservoir chalks of North Sea oilfields*, Mancuso & Tarantino (eds), Taylor & Francis Group.
- Richards, L.A. (1931). *Capillary conduction of liquids in porous medium*. Physics 1, pp. 318–333
- Romero, E. (1999). *Characterization and thermo-hydro-mechanical behavior of unsaturated boom clay: an experimental study*. Doctoral Thesis, E.T.S. Ing. Caminos, Univ. Polit. Cat.
- Romero, E.; Simms, P.H. (2008). *Microstructure investigation in unsaturated soils: A Review with Special Attention to Contribution of Mercury Intrusion Porosimetry and Environmental Scanning Electron Microscopy*. J. of Geotechnical & Geological Engineering, 26, nº 6, pp. 705–727.
- Schanz, T. (1998). *Zur Modellierung des mechanischen Verhaltens von Reibungsmaterialien*. Habilitation, Stuttgart Universität.
- Simunek, J.; van Genuchten, M.T.; Sejna, M. (2005). *The HYDRUS-1-D Software Package for Simulating the Movement of Water, Heat, and Multiple Solutes in Variably Saturated Media, Version 3.0, HYDRUS Software*, Dep. of Environ. Sci., Univ. of Calif. Riverside.
- Smith, R.E.; Smettem, K.R.J.; Broadbridge, P.; Woolhiser, D.A. (2002). *Infiltration Theory for Hydrologic Applications*. Water Resources Monograph 15, American Geophysical Union.
- Sridharan, A.; Rao, A. (1981). *Rectangular hyperbola fitting method for one-dimensional consolidation*. Geotechnical Testing Journal, 4, nº 4, pp. 161–168.
- Sridharan, A.; Murthy, N.S.; Prakash, K. (1987). *Rectangular hyperbola method of consolidation analysis*. Géotechnique, 37, nº 3, pp. 355–368.

- Tan, S.A. (1995). *Validation of hyperbolic method for settlement in clays with vertical drains*. Soils and Foundations, 35, nº 1, pp. 101–13.
- Tan, T.S.; Inoue, T.; Lee, S.L. (1991). *Hyperbolic method of consolidation analysis*, J. of Geotechnical Engineering, ASCE, 117, nº 11, pp. 1723-1737.
- Tarantino, A. (2010). *Basic concepts in the mechanics and hydraulics of unsaturated geomaterials*. *Mechanics of unsaturated materials*, Wiley (ed. L. Laloui).
- Vanapalli, S.K.; Nicotera, M.V.; Sharma, R.S. (2008). *Axis translation and negative water column techniques for suction control*. Geotechnical & Geological Engineering, pp. 645-660.
- Villar, M.V. (2000). *Caracterización termo-hidro-mecánica de una bentonita de Cabo de Gata*. Tesis Doctoral, Fac. Geológ., Univ. Compl. de Madrid.
- Vanapalli, S.K.; Nicotera, M.V.; R.S. Sharma (2008). *Axis translation and negative water column techniques for suction control*. J. of Geotechnical & Geological Engineering, 26, nº 6.
- Van Genuchten, M. T. (1980). *A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soil*. Soil Science of America Journal, 44, pp. 892-898.
- Youngs, E.G. (1960). *The drainage of liquids from porous materials*. J. of Geophysical Research, 65, pp. 4025-4030.
- Youngs, E.G.; Aggelides, S. (1976). *Drainage to a water table analysed by the Green-Ampt approach*. Journal of Hydrology, 31, pp. 67-79.

INTERVENIÊNCIA DE REFORÇO EM LASTRO FERROVIÁRIO SOB CARGA DE ALTO TRÁFEGO

Intervenience of reinforcement in railway ballast with load of high traffic

Luiz Gustavo Paulo Oran^a, Delma de Mattos Vidal^a, José Amaro de Souza Romero^b, Kledermom Garcia^b, Elizeu do Nascimento Filho^b

^a Divisão de Engenharia Civil, ITA - Instituto Tecnológico de Aeronáutica, Brasil

^b Sub-divisão de Ensaios Estruturais, IAE - ASA E - CTA, São José dos Campos, Brasil

RESUMO – Os lastros constituintes da superestrutura de vias permanentes, quando submetidos a cargas cíclicas de alta intensidade e frequência, sofrem desgaste rápido em sua estrutura portante. Os desguarnecimentos e nivelamentos dos lastros demandam grandes volumes por quilômetro devido à sua degradação. Seus ombros e altura mínimos de construção definem contornos de seções com largas bases de brita. Devido a isso, o desgaste do particulado e seus custos de manutenção inflam o orçamento das ferrovias. Com esse mote, escolheu-se aqui caminhar por um itinerário investigativo cujo paradigma tem seu cerne no conceito de confinamento e seus efeitos sobre o Módulo de Resiliência do lastro. A pesquisa se manteve nos efeitos práticos de reforços por geogrelhas aplicado dentro do corpo do lastro e não na interface com a camada subjacente. Nesse trabalho atingiu-se o objetivo proposto de levantar parâmetros diretivos para orientar ensaios de desempenho de reforços e possibilitar a melhor compreensão das causalidades decorrentes das propriedades específicas das geogrelhas como abertura da malha e rigidez dos elementos, bem como correlacionar o efeito da cota de posicionamento do reforço e os efeitos sobre o grau de confinamento gerado.

ABSTRACT – The ballasts constituent of the superstructure of railways, when submitted to cyclic loads of high intensity and frequency, suffer rapid wear in its supporting structure. The dismantling and levelling of ballasts demand large volumes per kilometer due to their degradation. Its minimal shoulders and height of construction define contours of sections with wide gravel bases. Because of this, particulate wear and its maintenance costs inflate the railroad budget. It was chosen to walk here on an investigative itinerary whose paradigm has its core in the concept of confinement and its effects on the Resilience Module of the ballast. The research remained on the practical effects of geogrid reinforcements applied within the ballast body and not at the interface with the underlying layer. In this work, the proposed goal of raising directional parameters to guide reinforcement performance tests and to better understand the causalities arising from geogrids specific properties such as mesh opening and stiffness of the elements, as well as correlating the position quotation effect reinforcement and its effects onto the degree of confinement generated.

Palavras Chave – Lastro reforçado com geogrelha, carga cíclica, atuador hidráulico.

Keywords - Reinforced ballast with geogrid, cyclic load, hydraulic actuator.

E-mails: oran@oran.eng.br (L. Oran), delma@ita.br (D. Vidal), amarojasr@iae.cta.br (J. Romero), kledermomkg@iae.cta.br (K. Garcia), elizeuenf@iae.cta.br (E. Filho)

1 – INTRODUÇÃO

Indraratna *et al.* (2011) comentam ser fato incontestável que os projetos de ferrovias sejam basicamente os mesmos há séculos, apesar da velocidade e da carga de transporte terem sofrido forte crescimento. A concepção de projeto considera em geral um sub-laço compactado sob um laço de pedra resistente, sobre o qual repousam trilhos de aço assentados em dormentes de concreto. Nessa geometria pelos ombros que tem a finalidade de reduzir o espalhamento lateral provocado no instante da passagem das composições férreas.

Dessa maneira, o laço de vias permanentes tem sido executado e tratado como uma camada pouco confinada de suporte de cargas. O grau de liberdade lateral oriundo desse fraco confinamento permite movimentos cuja consequência é a contaminação por finos exógenos e endógenos, amplificadores dos custos de manutenção, resultantes do inadequado grau confinante existente nesses projetos convencionais. Portanto, caso a engenharia possa projetar estruturas nas quais o confinamento do agregado seja superior ao que se consegue nesses projetos tradicionais, deve-se obter como resultado, estruturas mais estáveis e de maior capacidade de suporte a cargas estáticas verticais e cíclicas. O transporte de carga apresenta desafios cada vez maiores. Por exemplo, a VALE, produtora de minério de ferro e de níquel, estabelece para seus trens na Estrada de Ferro Carajás - EFC - parâmetros atuais que demandam velocidades em torno de 70 km/h, com 37,5 toneladas/eixo.

A relação causal da presença de estruturas com características ativas de confinamento de laço de vias permanentes e o pensamento heurístico fornecem maior abrangência a esse princípio de simular as condições reais de tráfego por meio de atuadores hidráulicos. Portanto, a utilização de um aparato com capacidade de reproduzir condições semelhantes às condições de campo é uma das alternativas possíveis de ensaio cuja aplicação encontra grande alinhamento com as condições realísticas das vias permanentes de transporte de minério, salvo suas intempéries.

Ensaio triaxiais sob cargas cíclicas realizados por Indraratna *et al.* (2010) e Merheb (2014) comparam variações de tensões confinantes e registraram sua relação causa-efeito. Cook e Horvat (2014) e Horvat e Klompaker (2014) avaliaram as faixas de influência nas profundidades de aplicação dos reforços de laço com resultados que indicam interferência positiva da geogrelha como reforço, mas que não tem aplicação direta em projetos, inclusive porque não aplicaram cargas cíclicas em frequência representativa da realidade, bem como as tensões alcançadas também estavam aquém das praticadas nas vias permanentes de transporte de minério. Essa interveniência, segundo McDowell *et al.* (2006) é otimizada a uma razão para as dimensões relativas do binômio laço-geogrelha. Para validarem a modelagem por elementos discretos realizaram ensaios e chegaram à proporção de 1,4 para a razão diâmetro nominal da abertura/diâmetro nominal do laço da malha da geogrelha.

Estudos com corpos de prova realísticos, em verdadeira grandeza, tendem a fornecer dados de saída de maior carga conclusiva e confiável, cujos resultados são importantes a validações de Modelos Mecanísticos. O estado da arte, pois, reside em conseguir aplicar cargas cíclicas típicas de composições ferroviárias a corpos de prova construídos com elementos em grande escala ou escala real. Vizcarra (2017), com ensaios em equipamento prismoidal triaxial cíclico, reforçou as conclusões sobre a influência da granulometria sobre as deformações permanentes e quebra do laço. Concluiu que lastros mais uniformes que os recomendados pela norma brasileira, quando submetidos a cargas cíclicas, apresentaram menor deformação permanente e menor quebra de partículas.

Para correlacionar a estabilidade do conjunto agregado-geogrelha, é preciso considerar aspectos do agregado tais como geometria, granulometria, densidade, resistência à abrasão (CLA) e resistência ao cisalhamento. Qian *et al.* (2015) afirmam que aspectos das geogrelhas utilizadas como reforços, tais como a rigidez dos nós, abertura da malha, resistência e rigidez dos elementos, determinam o desempenho do sistema.

Desse modo, os resultados do presente trabalho tiveram seu cerne na avaliação do grau de interferência da utilização da geogrelhas sobre o aumento do grau de confinamento do particulado de lastro e consequente aumento de seu Módulo de Resiliência. Para tanto, foram utilizadas configurações de montagem de lastro que maximizassem a interveniência desse reforço já que sem confinamento longitudinal no eixo dos trilhos e sem o lateral pelos ombros, os corpos de prova ficaram submetidos apenas à tensão confinante derivada do imbricamento da geogrelha. Atingiu-se a meta de obter parâmetros para nortear os próximos ensaios. As configurações de representatividade englobaram o aspecto de confinamento longitudinal intrínseco às vias permanentes, com aparato de perfil metálico representando o seccionamento transversal da via. Nesse novo prisma estão as propriedades específicas das geogrelhas, cuja interferência tem seu mote na rigidez dos nós e elementos de tiras sobre o Módulo de Resiliência.

2 – CONFIGURAÇÃO DOS ENSAIOS

Cuidou-se em maximizar a visualização do efeito da geogrelha, adotando-se nesta fase da pesquisa corpos de prova na forma de tronco de pirâmide, sem confinamento lateral ou longitudinal, e total supressão do ombro, com objetivo de analisar no extremo a interveniência da presença de reforço de geogrelha, dando liberdade de deslocamento lateral em ambos os eixos horizontais, conforme as inclinações sugeridas na DNIT-ISF 212 (2015), que também indica uma espessura do lastro de 30cm para base rígida.

Para avaliação de possível espectro de influência de reforço com geogrelha nesse estudo, três situações serão analisadas, neste contexto de montagem em tronco de pirâmide: sem reforço, com um reforço a 10cm do topo e com um reforço a 20cm do topo, denominadas respectivamente R0, R1 e R2. A Figura 1 apresenta a geometria de montagem dos ensaios com lastro reforçado e a Figura 2 ilustra suas etapas de montagem.

Nessa construção foi utilizada uma placa de compensado tipo tapume, com o intuito de evitar contato direto metal-brita, pois a base do atuador hidráulico é uma espessa chapa metálica. Sobreposto a essa placa foi posicionado um geocomposto geogrelha/geotêxtil não tecido, conforme nomenclatura definida pela ABNT-NBR 13.370 (2017) e adotada pela IGS Brasil, nas dimensões de 1,30m x 1,30m, para evitar o espalhamento lateral na interface. Por cima foi posicionada a quantidade prevista de lastro para compor o corpo de prova, com as dimensões pré-definidas para as configurações com e sem reforço. Na sequência dos ensaios, verificou-se ser indiferente para o espalhamento lateral na base a presença desse geocomposto.

3 – MATERIAIS E MÉTODOS

3.1 – Brita

Para o lastro foi utilizada uma brita da Pedreira Jambeiro/SERVENG, em São José dos Campos-SP, típica de lastro ferroviário, com a granulometria indicada no Quadro 1. Em particular, a amostra

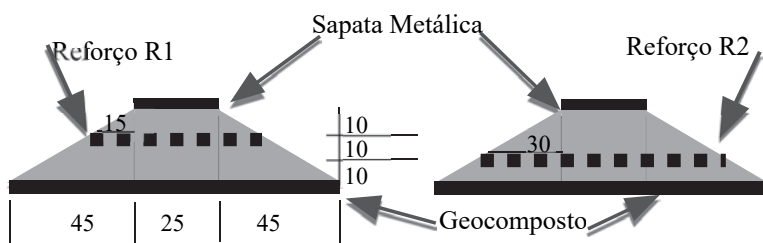
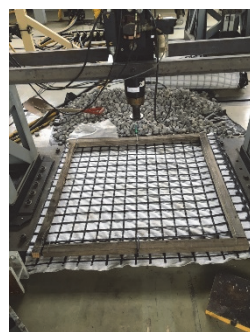


Fig. 1 - Esquema de montagem dos corpos de prova (dimensões em cm).



(a) Tapume na base



(b) Geocomposto



c) Corpo de prova montado



d) Nivelamento

Fig. 2 - Etapas de montagem do corpo de prova.

do material do lastro foi selecionada com granulometria concordante com ABNT-NBR NM 26 (2001) e AREA n. 24, mostrada no Quadro 2, enquanto suas características geométricas apresentavam lamelaridade e alongamento acima das taxas orientadas por estas normas, aspectos estes causadores de maior degradação e formação de finos e consequente expectativa de pior desempenho e menor vida de serviço.

Para esta brita do Quadro 2, ensaios de resistência à abrasão (CLA) indicaram 35% de perda, resultado dentro dos padrões da ABNT-NBR 5564 (1991), embora a Estrada de Ferro Vitória-Minas (EFVM) e a Ferrovia Centro-Atlântica (FCA) adotem até 25%. O peso específico dos grãos é 2.400 kg/m³. Cada ensaio necessita de um volume de lastro igual a 0,167m³, com peso aproximado de 400kg.

Quadro 1 – Distribuição Granulométrica da Brita 3 - Pedreira SERVENG/Jambeiro.

Peneiras		Amostra 1			
		Peso da Amostra			% Passante
Abertura (mm)	Malha (ABNT)	Peso Retido Acumulado (g)	% Retido na Peneira	% Retido acumulado	
63,5	2 1/2"	0	0	0	100
50,8	2"	2.412,00	12,99	13,0	87,0
37,5	1 1/2"	12.590,00	67,83	80,8	19,2
25,4	1"	2.236,10	12,05	92,9	7,1
19,1	3/4"	920,00	4,96	97,8	2,2
12,7	1/2"	-	-	-	-

Quadro 2 – Granulometria da brita de lastro na NM 26 e na AREA n. 24.

Abertura #	% Passante	
	NM 26	AREA n. 24
76(3")	-	100
64(2 1/2")	100	90-100
50(2")	80-100	-
38(1 1/2")	40-70	25-60
25(1")	10-30	-
19(3/4")	0-10	0-10
12,5(1/2")	0-5	0-5

3.2 – Geogrelha

O reforço utilizado foi uma geogrelha tecida em poliéster, denominada pelo fabricante FORTRAC 80/80 70T, com as características de abertura da malha versus diâmetro nominal do lastro dentro da razão verificada McDowell et al. (2006) para melhor desempenho, ilustrada na Figura 3. Considerando essa figura, na horizontal a rigidez medida dos elementos CMD (Cross Machine Direction) foi de (969 ± 23) kN/m e dos elementos MD (Machine Direction) (907 ± 54) kN/m. Valores medidos em um equipamento de tração Instron 5500, de acordo com a diretriz de ensaios da ASTM D6637 (2016).

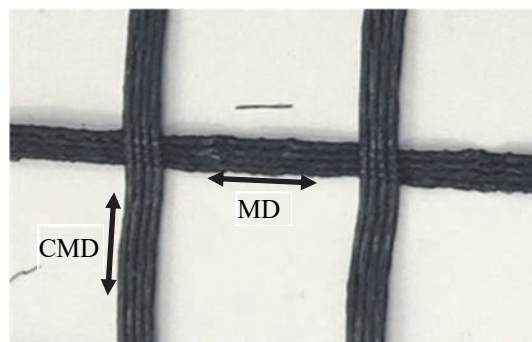


Fig. 3 – Geogrelha Tecida de Poliester.

3.3 – Carregamento aplicado

Para estabelecer as cargas a serem aplicadas adotou-se como padrão a composição de transporte de minério de ferro da Estrada de Ferro Carajás (EFC). Matos et al. (2015) detalham que seus vagões, do tipo GDT, atingem 37,5 toneladas por eixo de carga estática e está com a configuração ilustrada na Figura 4.

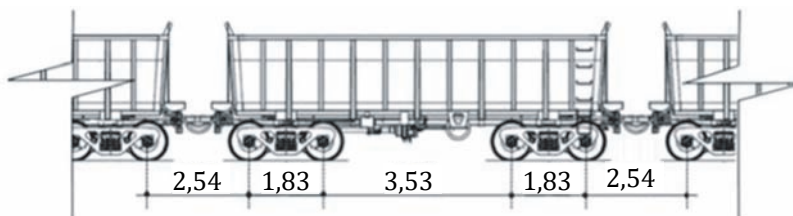


Fig. 4 - Vagão GDT na EFC (dimensões em metros), (Matos et al., 2015).

Conforme Lichtberger (2005), para calcular a carga dinâmica num dormente, constatou-se estarem os eixos suficientemente espaçados de modo a não haver superposição de carregamento, e que apenas 40% da carga aplicada no ponto abaixo do eixo atua sobre o dormente. Um coeficiente dinâmico igual a 2, segundo Nabais (2014), indica uma carga máxima por roda de 15 ton. Adotou-se o resultado observado por Merheb (2014) em estudos de campo. Ele verificou que a tensão residual tende a 50% da tensão máxima aplicada.

Desse modo, a carga cíclica adotada neste estudo variou entre 15,0 e 7,5 toneladas. A partir da área do dormente em campo, dada pela largura dormente (0,24 m) e pela largura da socaria (0,80 m), obtém-se a tensão máxima de 7,81 kgf/cm². Para a área de contato da sapata no ensaio 0,25 m x 0,25 m, a carga aplicada deve ser de 4,88 toneladas para a máxima e 2,44 toneladas para a residual.

3.4 – Cuidados na montagem

A montagem deve garantir as dimensões anotadas na Figura 1, sendo importante assegurar o nível nos 2 eixos horizontais, na superfície do topo do corpo de prova em contato com a sapata metálica. A Figura 5 apresenta uma vista lateral dos ensaios R1 e R2.



(a) Reforço R1



(b) Reforço R2

Fig. 5 - Vista Lateral dos corpos de prova reforçados com Geogrelha.

Submeteu-se cada corpo de prova a uma vibração de compactação inicial, em analogia ao realizado na construção de ferrovias, porém com a sequência de aplicar cargas crescentes à taxa de 10% até atingir a carga máxima de 4,88 toneladas, cuja residual seguiu a proposta de 50% da máxima. O carregamento aplicado foi cossenoidal de 9 Hz, com a tensão máxima e a residual indicadas no item 3.3. No passo seguinte, aplicaram-se 200.000 ciclos de carga cíclica, correspondente a 152 trens de carga da EFC (Estrada de Ferro Carajás/VALE) a uma velocidade de 70 km/h (19,5 m/s), equivalente aos 9 Hz, sendo nove o número de eixos desse tipo de vagão passantes por um mesmo ponto no intervalo de um segundo.

4 – RESULTADOS

A Figura 6 descreve o comportamento ao longo dos abatimentos medidos durante os ensaios. O recalque na configuração R1 foi cerca de 1/4 do obtido para a configuração R0.

Para avaliar a receptibilidade do ensaio, tomou-se a configuração de melhor desempenho, R1, e montou-se uma contra-prova, R1a. Após submissão às mesmas condições de trabalho, os resultados foram satisfatoriamente próximos, mantendo mesmo padrão e ordem de grandeza, como atesta a Figura 7 e sua degradação resultou em 0,15% do volume de lastro do corpo de prova, conforme mostrado no Quadro 3. Os abatimentos e as deformações mantiveram mesmo padrão, amplitude e ordem de grandeza.

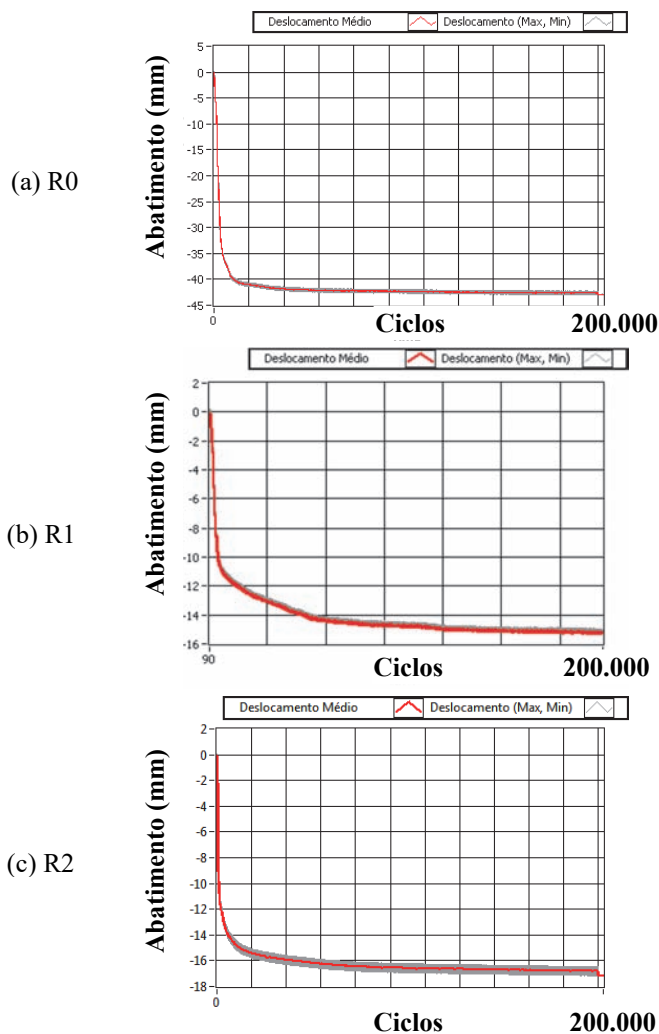


Fig. 6 - Deslocamento nos corpos de prova até 200.000 ciclos de carga cíclica, 9 Hz, conforme indicação de carregamento verificado em campo por Merheb (2014).

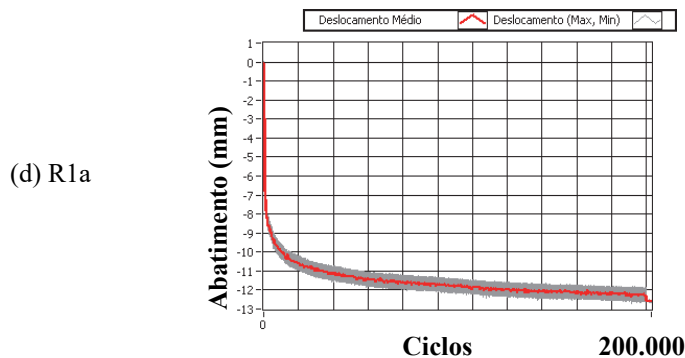


Fig. 7 - Deslocamento no corpo de prova R1a até 200.000 ciclos de carga cíclica.

O Quadro 3 apresenta os dados comparativos de abatimento e deformação, tomados a 20.000 e a 200.000 ciclos de carga no atuador, e degradação tomada ao final dos ciclos. Conforme Selig e Waters (1994), Indraratna e Salim (2005) e Ionescu et al. (1998), nos primeiros 20.000 ciclos ocorrem as deformações mais acentuadas no lastro novo, devido ao processo de compactação pela própria carga transportada. Por essa razão comparou-se a degradação a partir desse ponto até o final da aplicação de carga. Os valores de abatimento estão acrescidos dos abatimentos iniciais durante compactação, não registados nos gráficos gerados a partir do instante seguinte a essa etapa.

Quadro 3 – Comparativo de abatimento, deformação e degradação.

Ciclos	Abatimento (mm)				Deformação				Degradação (%)			
	R0	R1	R1a	R2	R0	R1	R1a	R2	R0	R1	R1a	R2
20 000	41.02	14.69	15.15	24.29	0.24	0.05	0.05	0.07	-	-	-	-
200 000	42.62	17.13	16.72	25.62	0.25	0.06	0.06	0.08	0.67	0.17	0.15	0.38
Avanço	3.90	16.60	10.40	5.50	3.60	16.60	10.40	5.50	-	-	-	-

O Módulo de Resiliência M_r , pode ser calculado a partir dos dados que geraram o gráfico tensão *versus* deformação, parcialmente mostrados na Figura 8, relacionando a tensão resiliente e a deformação resiliente. Os valores obtidos na fase final indicam valores médios para esses módulos. Sendo 113 MPa para o ensaio R0, 528 MPa para o ensaio R1 e 126 MPa para o ensaio R2, evidenciando uma alteração significativa com a presença da geogrelha, principalmente em R1, cujo comportamento de lastro foi de característica mais rígida.

O próprio avanço das deformações apresenta peculiaridades bem definidas entre as situações com e sem reforço. Enquanto os corpos de prova reforçados deformam em maior harmonia, o ensaio R0 demonstrou comportamento errático desde as primeiras toneladas aplicadas pela carga cíclica até o final dos 200.000 ciclos. As quebras de particulado foram maiores desde o início; razão pela qual há saltos na deformação.

A correlação de M_r com a Tensão e a deformação do corpo de prova pode ser percebida na Figura 8. Os avanços da deformação na montagem R1, cujo Módulo de Residência ficaram bem destacado dos demais. Foram mais uniformemente distribuídos desde as primeiras centenas de cargas aplicadas. Tendo menos quebras de partículas, o progresso das deformações é mais lento e suave. Em R2, a uniformidade também pode ser observada, embora a taxa de deformação tenha sido maior nas primeiras centenas de ciclos de carga em contraposição a R1.

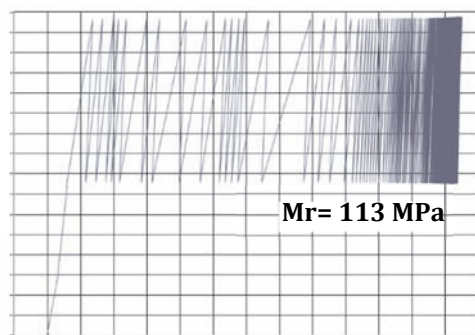
5 – COMENTÁRIOS

O ganho no módulo resiliente ao se aplicar o reforço a 20 centímetros base (R1) foi da ordem de 234% em confrontação com a configuração sem Reforço (R0). Já em relação à posição de reforço a 10 centímetros da base (R2), o ganho no Módulo de Resiliência foi de somente 18% em relação ao ensaio sem reforço. Na sequência lógica, a melhoria de Resiliência entre R2 e R1 foi de 183%.

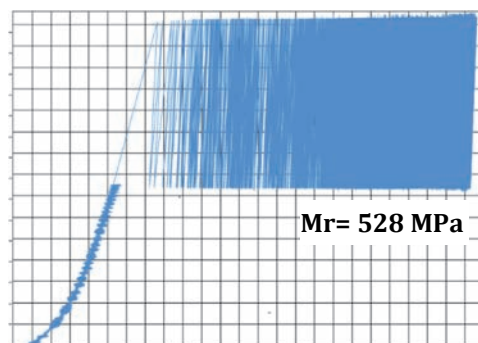
Com 200.000 ciclos de ensaio, equivalente a 7.524.000 de toneladas transportadas, houve boa diferenciação nas deformações permanentes para cada configuração estudada. Para R0 foi de 0,248 (25%); no caso e R1, de 0,058 (5,8%), localizado entre estes, R2 teve 0,075 (7,5%) de deformação. Portanto, a deformação no ensaio R1 foi de 20% da deformação no ensaio R0 e no ensaio R2 foi de 30% do medido no ensaio R0.

Observou-se a forte interveniência do Módulo de Resiliência sobre o abatimento vertical. Pequenas variações nesse indicador resultam em respostas de considerável amplitude no recalque final e na geração de finos. De forma suplementar, notou-se que a configuração R1 teve abatimento total menor ao final dos 200.000 ciclos.

(a) R0



(b) R1



(c) R2

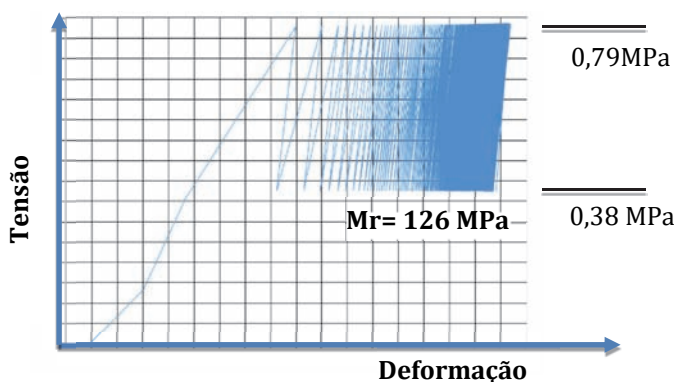


Fig. 8 - Curvas Tensão (MPa) x Deformação para as condições da EFC simuladas no Atuador Hidráulico do IAE/ASA-E.

Esse resultado pode ser explicado pelo fato de com o maior confinamento na zona de maior concentração de tensões, as quebras do particulado do lastro acontecem em menor velocidade e grau, levando mais tempo para que a degradação por quebra atinja os índices medidos para R0 e R2. O abatimento se deu predominantemente por compactação e formação de finos por abrasão que pelas quebras dos particulados diretamente.

Estes resultados explicam por que a aplicação do reforço desse corpo-de-prova sob carga cíclica análoga à aplicada na EFC provocou ganho de desempenho no que diz respeito ao abatimento vertical. Para o mesmo número de passagem de trens - 152 composições - o recalque sofrido para a situação extrema de R0 - sem confinamento lateral nos eixos longitudinais e transversais - foi 2,5

vezes maior ao confrontado com a configuração R1 e 1,7 vezes maior em comparação com a configuração R2. E o abatimento de R2 foi 1,5 vezes maior que o de R1.

Segundo Ribeiro et al. (2014), a norma europeia EN 13450 (2002) a faixa de intervenção varia de 12 mm a 19 mm para trens com velocidades de 60 a 80 km/h e que o limite de recalque seja de 25 mm, cuja não observância expõe a risco a segurança da via.

Magalhães et al. (2009) afirmam que para cada ciclo de nivelamento (25 mm de abatimento) haveria necessidade de repor 3, 25% do volume de lastro. Na configuração R0 com 200.000 ciclos já se estaria próximo ao segundo levante de nivelamento, enquanto para as configurações R1 e R2 ainda não seria realizado qualquer nivelamento. Cada levante de 25 mm equivale a 66 m³ de brita por quilômetro.

A EFC estimou em 260 milhões de toneladas de minérios transportados em 2016. Assumindo que cada vagão tem capacidade de 150 toneladas, são necessários 1.733.333 vagões, ou 5.253 trens de 37,5 toneladas/eixo a 70 km/h. Considerando que um abatimento de 25mm equivale a 40% do lastro degradado, conforme Magalhães et al. (2009), Indraratna e Nimbalkar (2013).

No Quadro 4 estão as estimativas calculadas para a quantidade de intervenções nas configurações dos ensaios. Os desgarnecimentos estão em decimais para melhor entendimento de sua proporção.

Quadro 4 – Prognóstico comparativo de manutenção por configuração para 260 milhões de tonelada transportada em trens da EFC.

	R0	R1	R2
Qt. de Trens/Desgarnecimento	1.113	3.095	2.782
Qt. Desgarnecimentos	4,7	1,7	1,9
Qt. Nivelamentos	58	21	23
Ton. Transportadas/Desgarnecimento	55.820.914	155.263.470	139.552.286
Tempo de Vida de Serviço (Meses)/Desguarn.	2,6	7,2	6,4
MTBT*/Desgarnecimento	55,8	155,3	139,6
Qt trens para 260 Mi ton			
5.253			
*MTBT= Milhões Ton. Brutas Transportadas			

Ao estudarem o Custo do Ciclo de Vida (LCC), Ribeiro *et al.* (2014) afirmaram que pelo fato de as deformações verticais ocorridas nas ferrovias serem do tipo elasto-plásticas - elástico ou resiliente (deflexões) e plásticas ou permanentes (recalques) - para manter a via em condições seguras, a engenharia da EFVM pretende manutenções com serviço de socaria a cada 180 milhões de toneladas brutas trafegadas (MTBT). Desse modo, a estrutura montada no ensaio do reforço R1 foi a única a se aproximar nos resultados de ensaios deste padrão de manutenção, mesmo nas condições limites de inexistência de confinamento também na direção longitudinal ao lastro, ou seja, sob valores desprezíveis de tensão confinante além da presença da geogrelha.

Estes resultados têm importância ao se considerar que, para métodos de compactação por garfos vibratórios, sua penetração no nivelamento poderia destruir a geogrelha situada a 10cm de profundidade. Assim, para se evitar danos ao reforço polimérico por esse tipo de compactação de lastro em via permanente, a aplicação a 20 centímetros de profundidade a partir do topo preservaria a integridade do reforço, embora o desempenho do sistema lastro-reforço tenha significativa perda.

6 – CONSIDERAÇÕES FINAIS

Da motivação em se obter parâmetros iniciais que indicassem o potencial desempenho de reforços do tipo geogrelha sobre o desempenho estrutural de lastros ferroviários, a estratégia de maximizar a influência da geogrelha por meio de redução de possíveis tensões confinantes não provenientes dela, mas decorrentes dos ombros e da restrições longitudinais ao longo do lastro na via, foi bem alcançada com a configuração em tronco de pirâmide, já que as relações causa-efeito ficaram majoradas.

Outros vetores de desempenho presentes na continuação desses estudos são os aspectos de rigidez dos nós e dos elementos das tiras. A interveniência dessas características será estudada por meio de ensaios similares aos realizados para este estudo, contudo, alterando tipos de geogrelhas para correlacionar suas propriedades de rigidez.

Em decorrência, pode-se extrair dos ensaios apresentados significativas alterações no Módulo de Resiliência a ponto de atribuir características funcionais aos corpos de prova construídos com o lastro menos nobre da amostra utilizada.

A produção de finos por degradação decorrente da passagem de trens simulada pelo atuador hidráulico foi menor em ambos os casos reforçados. E dentre esses, a situação com reforço mais próximo à aplicação da carga R1 sofreu menor degradação.

Pode-se concluir que para o volume de carga acima, o tempo de vida de serviço do lastro estaria prolongado em 3,44 vezes ao se comparar R0 e R1; enquanto na comparação com R2, o ganho seria de 2,50 vezes.

Em relação às interveniências no comportamento da deformação resultante das tensões típicas aplicadas, constatou-se um progresso regular em ambos os casos reforçados - R1 e R2 - em contraponto ao avanço registado para R0, cujo Módulo de Elasticidade oscilou até alcançar seu equilíbrio assintótico.

Nessa sequência, o consumo de brita passaria de 3.854 m³/km/ano em R0 para 1.122 m³/km/ano em R1 e 1.544 m³/km/ano para R2.

A aplicação de geogrelha atribuiu características de resiliência superiores à situação de sua ausência. Mesmo com o fato de as amostras utilizadas serem de características mineralógicas e granulométricas fora das recomendações normativas brasileiras e americanas, o desempenho adquirido após o reforço proporcionou comportamento plenamente satisfatório em ensaios sob condições geométricas desfavoráveis, como o tronco de pirâmide dos corpos de prova, e submetido a solicitação de carregamento cíclico de elevado efeito de degradação do lastro.

A presença de geogrelhas, com características de abertura e rigidez controladas, reduziu a influência direta dos aspectos granulométricos e mineralógicos dos materiais de lastro sobre sua degradação.

A utilização de um atuador hidráulico para simular os efeitos de trens de elevada carga/eixo, fora das configurações mais usuais de ensaios triaxiais, representou de forma consistente o carregamento cíclico sem instabilidade da estrutura. Constatou-se que este caminho pode e deve ser explorado em pesquisas mais realísticas sobre novas formas de construção de superestruturas de ferrovias.

Desse modo, devem ser realizados estudos continuados sobre novas configurações de vias permanentes por meio de reforços de seu lastro. Os ganhos de tensão confinante observados nesta investigação sugerem que geometrias mais econômicas podem ser obtidas sem perda de desempenho na vida de serviço do lastro, mesmo sem considerar o usual reforço da camada subjacente.

7 – AGRADECIMENTOS

À Subdivisão de Ensaios Estruturais (ASA-E) do Instituto de Aeronáutica e Espaço (IAE) do DCTA, pelo apoio na montagem e realização dos ensaios de carga cíclica com atuador hidráulico, à

Mineradora Serveng/Jambeiro e à Huesker do Brasil, pelo fornecimento de material para ensaios, e à CAPES pelo apoio financeiro.

8 – REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ABNT-NBR NM 26 (2001). *Agregados - Amostragem*. Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT). Rio de Janeiro, Brasil.
- ABNT-NBR 5564 (1991). *Via Férrea - Lastro Padrão*. Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT). Rio de Janeiro, Brasil.
- ABNT-NBR 13.370 (2017). *Não tecido - Terminologia*. Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT). Rio de Janeiro, Brasil.
- ASTM D6637 (2016). *Standard Test Method for Determining Tensile Properties of Geogrids by the Single or Multi-rib Tensile Method*, West Conshohocken, PA.
- Cook, J.; Horvat, F. (2014). *Assessment of Particle of confinement within a mechanically stabilized layer*. 10th International Conference on Geosynthetics. Berlin.
- DNIT-ISF-212 (2015). *Projeto de Superestrutura de Via Permanente - Lastro e Sublastro*. Instrução de Serviço Ferroviário, Ministério dos Transportes, Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes, Brasil.
- EN 13450 (2002). *Aggregates for Railway Ballast*. European Standard - European Committee for Standardization, Brussels.
- Horvat, F.; Klomp maker, J. (2014). *Investigation of confinement effect by using the multi-level shear box test*. 10th International Conference on Geosynthetics, ICG 2014.
- Indraratna, B.; Nimbalkar, S. (2013). *Stress-Strain Degradation Response of Railway Ballast Stabilized with Geosynthetics*. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, v. 139, n. 5, p. 684–700.
- Indraratna, B.; Salim, W. (2005). *Mechanics of Ballasted Rail Tracks: a Geotechnical Perspective*. Taylor & Francis Group plc. Londres, 248 pp.
- Indraratna, B.; Salim, W.; Rujikiatkamjorn, C. (2011). *Advanced Rail Geotechnology - Ballasted Track*. Wollongong City: CRC Press.
- Indraratna, B.; Thakur, P.; Vinod, J. (2010). *Experimental and Numerical Study of Railway Ballast Behavior under Cyclic Loading*. International Journal of Geomechanics, Vol. 10, No. 4, pp 136-144.
- Ionescu, D.; Indraratna, B.; Christie, H. D. (1998). *Behaviour of railway ballast under dynamic loads*. Proc. 13th Southeast Asian Geotechnical Conference, Taipei, pp. 69–74.
- Lichtberger, B. (2005). *Track Compendium. Formation, Permanent Way, Maintenance, Economics*. EURAILPRESS.
- Magalhães, P. C. B.; Duval Filho, E.; Silva, M. W. P. (2009). *Via Permanente - Módulo VIII*. São Luís: VALER - Educação VALE.
- Matos, J. C. L.; Branco, V. H. L.; Oliveira, D. R. C. (2015). *Structural assessment of a RC Bridge over Sororó river along the Carajás railway Avaliação estrutural da ponte sobre o rio Sororó na ferrovia Carajás*. v. 8, n. 2, p. 140–151.

- McDowell, G. R.; Harireche, O.; Konietzky, H.; Brown, S. F.; Thom, N. H. (2006). Discrete element modelling of geogrid-reinforced aggregates. In: Proceedings of the Institution of Civil Engineers-Geotechnical Engineering, v. 159, n. 1, p. 35–48.
- Merheb, A. H. M. (2014). *Análise Mecânica do Lastro Ferroviário por Meio de Ensaio Triaxiais Cíclicos*. Dissertação de Mestrado. Escola Politécnica da Universidade de São Paulo.
- Nabais, R. J. S. (2014). *Manual Básico de Engenharia Ferroviária*. São Paulo, Oficina de Textos.
- Qian, Y.; Tutumluer, E.; Hashash, Y. M. A. Ghaboussi, J. (2015). *Effects of Ballast Degradation on Permanent Deformation Behaviour from Large-Scale Triaxial Tests*. 2014 Joint Rail Conference, p. 1–5.
- Ribeiro, F. S.; Bernucci, L. B.; da Costa, R. C.; de Moura, Edson. (2014). *Análise do Custo do Ciclo de Vida do Lastro Ferroviário na Estrada de Ferro Vitória-Minas*. [s.d.]. XXVIII ANPET.
- Selig, E. T.; Waters, J. M. (1994). *Track Geotechnology and Substructure Management*. Thomas Telford, London.
- Vizcarra, G. O. C. (2017). *Efeito da Granulometria no Comportamento Mecânico de Lastro Ferroviário*. Tese de Doutorado PUC-RIO.

COMPORTAMENTO TÉRMICO DO SOLO: ESTUDO EXPERIMENTAL PELO HOT WIRE METHOD E APLICAÇÃO NUMÉRICA

Soil thermal behaviour: Characterization by the Hot Wire Method and numerical application

Henrique Lopes^a, Ana Vieira^b, Sofia Soares^c

^a Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade Nova de Lisboa, Portugal.

^b Departamento de Geotecnia do Laboratório Nacional de Engenharia Civil, Portugal

^c Escola Superior de Tecnologia e Gestão do Instituto Politécnico de Beja, Portugal.

RESUMO – A crescente preocupação revelada pelas sociedades no que respeita à sustentabilidade energética do planeta, tornou-se o principal impulsionador para o desenvolvimento de formas de exploração de energia que contribuam para a redução dos gases com efeito de estufa. Os sistemas geotérmicos de baixa entalpia são hoje uma das tecnologias que utiliza recursos renováveis para climatização com maior crescimento em toda a Europa. O seu princípio base está associado à utilização do solo como fonte e dissipador de calor. O estudo dos mecanismos de transferência de calor e das propriedades térmicas do solo é determinante para avaliar a sua resposta como permutador de calor, e assim dimensionar e projetar sistemas mais eficientes. No âmbito de um trabalho de dissertação de mestrado relativo a Sistemas Geotérmicos de Baixa Entalpia, apresentam-se neste artigo alguns resultados relativos à caracterização térmica de um solo arenoso e parte das análises numéricas conduzidas relativas à interação térmica solo-estaca (transferência por condução). No âmbito do trabalho de laboratório foi concebido um sistema para medição da condutividade térmica de uma areia seca pelo *Hot Wire Method*, analisando-se entre outros, aspetos, a influência do índice de vazios na condutividade. As análises numéricas, que incluem apenas o processo de transferência de calor por condução, visam essencialmente, apresentar as principais variáveis envolvidas no funcionamento de uma estaca termoativa para condições de saturação nula e total e possíveis gamas de alteração de temperaturas.

ABSTRACT – The rising concern revealed by society in the last years, regarding the energetic sustainability of the planet, has become the main driver for the development of new techniques to explore energy that contribute to a decrease in greenhouse gases emission. The Ground Source Energy Systems are currently one of the most applied renewables technologies used for heating and cooling all over Europe, with its basic principle laying in the consideration of the soil as a heat source or sink. The study of the thermal transfer mechanisms and thermal properties that characterize the soil thermal behavior are therefore crucial in the evaluation and design of more efficient systems. This work presents the thermal characterization of a sandy soil and a set of numerical analysis relative to the thermal soil-pile foundation interaction. The laboratory work consists on a series of thermal conduction tests by carried out in an apparatus conceived for that purpose. The results interpretation is based on the *Hot Wire Method*. The influence of factors such as the void ratio on the thermal conductivity is analysed. The numerical analyses, only taking into account heat conduction, has the main purpose of presenting the main variables involved in a thermoactive pile operation for dry and totally saturated conditions as well as the possible temperature range involved.

Palavras Chave – Caracterização térmica de solos, *Hot Wire Method*, modelação numérica.

Keywords – Soil thermal characterization, Hot Wire Method, numerical modelling.

E-mails: hl.lobes@campus.fct.unl.pt (H. Lopes), avieira@lnec.pt (A. Vieira), sofia.soares@ipbeja.com (S. Soares)

1 – INTRODUÇÃO

A caracterização térmica de solos é necessária para diversas aplicações em diferentes domínios específicos da Engenharia Civil, nomeadamente na construção de rodovias, *pipelines*, cabos elétricos enterrados e vários outros tipos de estruturas e infraestruturas (Farouki, 1981). Para além destas aplicações, o estudo das propriedades térmicas dos solos ocupa lugar de destaque em áreas como a geologia, agronomia e meteorologia. Mais recentemente, esta temática tem encontrado espaço no domínio dos recursos geotérmicos de baixa entalpia, em particular no seu aproveitamento para climatização através de Sistemas Geotérmicos de Baixa Entalpia (*Ground Source Energy Systems*), especialmente naqueles que utilizam bombas de calor (*Ground Source Heat Pump Systems*–GSHP). No início dos anos 80 estes sistemas foram pela primeira vez utilizados em estruturas de fundação para captação e injeção de calor no solo. Deste modo, acrescentou-se aos elementos de betão, além da função estrutural, a de permutador de calor com o solo. A Suíça e Áustria foram os países pioneiros onde se iniciou a exploração através de lajes de fundo. Em 1984 o princípio de estrutura termoativa ou geotermoativa começou a ser utilizado em estacas, tendo em 1996 sido alargado às paredes moldadas, verificando-se daí em diante um crescimento significativo na sua utilização (Brandl, 2006). Os *Ground Source Energy Systems* são hoje aplicados em habitações uni e multifamiliares, escritórios de grande e pequena dimensão, infraestruturas subterrâneas, de que são exemplo estações de metropolitano (Lund *et al.*, 2011), no domínio da agropecuária, para climatização de estufas ou aviários, nas pescas, em unidades de piscicultura e no sector industrial dos têxteis e do vinho (Madureira e Antunes, 2012).

De entre os sistemas geotérmicos superficiais, aqueles que utilizam estruturas de fundação termoativas tem apresentado grande desenvolvimento em toda a Europa, prevendo-se a sua crescente e generalizada utilização no futuro. Como exemplos paradigmáticos de utilização desta tecnologia para climatização, refere-se terminal E do Aeroporto Internacional de Zurique, a estação *Taborstraße*, linha U2 do metro de Viena (Adam e Markiewicz, 2009), ou o *Swiss Federal Institute of Technology* em Lausanne (Pahud e Hubbuch, 2007). Em Portugal a utilização de estruturas de fundação como permutadores de calor é praticamente inexistente, todavia destacam-se os aproveitamentos existentes em alguns edifícios pertencentes à Universidade de Aveiro.

No presente trabalho apresentam-se parte dos resultados obtidos por Lopes (2014) no âmbito da sua Dissertação de Mestrado, na qual se pretendeu caracterizar em primeira análise uma amostra de solo arenosa, de natureza siliciosa, para, num segundo plano, se proceder à modelação numérica do seu comportamento térmico para dois cenários distintos. Um, onde se estudou a influência isolada da variação anual de temperatura, e outro onde se simulou o carregamento térmico anterior associado ao carregamento imposto por uma estrutura termoativa de fundação.

2 – MECANISMOS DE TRANSFERÊNCIA DE CALOR E PROPRIEDADES TÉRMICAS DO SOLO

O solo é um sistema multifásico constituído por um conjunto de partículas sólidas de diferentes formas e tamanhos, cujos vazios são ocupados por ar e água. As suas propriedades térmicas são por isso dependentes da água e ar que preenche os seus vazios, e das diferentes partículas que constituem a fase sólida.

Segundo Farouki (1981), Hillel (1998), Brandl (2006), Banks (2012) e Laloui e Di Donna (2013), as propriedades térmicas dos solos e o seu respetivo comportamento térmico são função dos índices base do solo como sejam, a sua massa volúmica (ρ), peso volúmico (γ), teor em água (w), grau de saturação (S_r), porosidade (n) e ainda da sua composição mineralógica, dimensão dos grãos e arranjo espacial das partículas.

Ao ser estabelecido um gradiente de temperatura, a transferência de calor nestes materiais ocorrerá isolada ou conjuntamente por condução, convecção, radiação, vaporização-condensação, trocas iónicas e congelação-descongelação (Brandl, 2006; Rees *et al.* 2000). O processo de

transferência de energia térmica verificar-se-á até que o gradiente térmico em todos os pontos seja nulo, altura em que o sistema atingirá um estado de equilíbrio.

A importância relativa de cada um dos mecanismos não é igual no sistema Terra. Autores como Lowrie (2007) e Williams e Smith (1989) consideram a condução como o mecanismo mais proeminente na crosta terrestre, realidade válida também para os solos que dela fazem parte (Brandl, 2006 e Rees *et al.*, 2000). Para Brandl (2006) a importância da condução nos solos é tal que os restantes mecanismos de transferência podem ser desprezados, caso a dimensão das partículas que o constituem e os seus espaços intersticiais sejam de dimensão reduzida relativamente ao volume total em análise.

Considerando apenas a transferência de energia térmica por condução, dois regimes térmicos podem ser considerados. Um, designado como permanente ou estacionário, e outro denominado variável ou transitório. O primeiro ocorre quando num determinado ponto não existe variação de temperatura no tempo. No segundo caso, para um dado ponto, existe variação de temperatura à medida que a transferência de calor decorre. A transferência de calor por condução é a mais comum na natureza (Çengel, 2003) e por isso também nos solos. Pode ser simplificada caracterizada através de três propriedades térmicas: a condutividade térmica (λ), o calor específico (c) e a difusividade térmica (α), esta última definida como o quociente entre a condutividade térmica e o produto entre a massa volumica e o calor específico, ou seja $\alpha = \lambda / (c \cdot \rho)$

Estas propriedades térmicas sofrem variações face à variação de alguns índices físicos. Qualquer solo, com um dado índice de vazios, sofre um incremento na sua condutividade térmica e calor específico face a uma variação positiva de teor em água ou grau de saturação. Tal comportamento é resultado da substituição do ar existente nos poros por água, em virtude do contraste significativo entre as propriedades térmicas dos dois materiais (Quadro 1). Também a redução do índice de vazios, ou seja, o aumento do peso volumico do solo, resulta em regra num aumento da condutividade térmica. A redução daquele índice físico conduz necessariamente ao aumento da quantidade de partículas sólidas por unidade de volume, isto é, verifica-se a substituição do ar ou água constituinte dos espaços intersticiais por material sólido com condutividade superior. Sob o ponto de vista térmico o solo observa um acréscimo e melhoria dos contactos entre partículas sólidas, contactos sólido-sólido, permitindo assim, segundo autores como Farouki (1981) e Hillel (1998), uma maior eficácia na transferência de calor por condução.

Quadro 1 - Propriedades térmicas de algumas substâncias

Substância	Condutividade térmica ($\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$)	Calor específico ($\text{J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$)
Água	0,613 ^{c)}	4186 ^{a)}
Ar	0,026 ^{c)}	1012 ^{b)}
Gelo	1,7 – 2,0 ^{d)}	1884 ^{b)}

a) Segundo Rees *et al.* (2000), b) Segundo Vieira e Maranhã (2012), c) Segundo Çengel (2003), d) Segundo Banks (2012)

Ainda que a condução seja o processo de transferência de calor dominante nos solos e o que mais influencia o desempenho de estruturas termoativas é importante, em casos particulares, considerar as condições hidrogeológicas ocorrentes, como seja a existência de um fluxo de água subterrânea de considerável dimensão, já que este pode funcionar como fluido de transporte de energia térmica (funcionando como dissipador) ou mesmo a existência de fenómenos de transferência de calor por convecção ao nível da água que preenche os interstícios do solo.

3 – CARACTERIZAÇÃO TÉRMICA DE UM SOLO ARENOSO

A caracterização térmica dos solos pode ser obtida através de ensaios de laboratório, ensaios *in situ* e métodos empíricos. Uma descrição pormenorizada dos métodos mais utilizados para o referido fim pode ser encontrada em Lopes (2014). Muitos outros trabalhos podem ser encontrados na

bibliografia onde se referem várias vias de determinação para a caracterização térmica de solos (e.g. Nikolaev et al., 2013; Low et al., 2015).

No presente trabalho optou-se pela utilização de um procedimento de ensaio laboratorial baseado no *Hot Wire Method* (HWM) (Healy et al., 1976). Trata-se de um método amplamente utilizado para a caracterização térmica de sólidos, líquidos, gases e materiais particulados. A sua aplicabilidade em solos é referida em trabalhos como Brandl (2006) e Merckx et al. (2012). Nesta secção, serão apresentados de forma sucinta os fundamentos teóricos do método de ensaio e todo o trabalho de caracterização térmica realizado.

3.1 – Método e procedimento de ensaio

O procedimento utilizado, como referido anteriormente, tem por base o *Hot Wire Method*, cujo fundamento teórico é sustentado pelo *Line Source Model*. Este modelo considera uma fonte de calor de extensão infinita e diâmetro infinitamente pequeno, introduzida num meio infinito homogêneo e isotrópico.

Para a aplicação desta metodologia na determinação da condutividade térmica é considerado um provete cilíndrico, cuja relação altura-diâmetro é suficientemente grande para que possam ser desprezados os efeitos de fronteira. O material que constitui o provete a ensaiar é considerado homogêneo e isotrópico e com propriedades térmicas constantes no tempo.

Segundo Carslaw e Jaeger (1959) e Franco (2007) em regime variável e para um período de aquecimento suficientemente grande, a temperatura num dado ponto à distância (r_a) da fonte de calor pode ser determinada através da equação:

$$T(r_a, t) = \frac{\dot{Q}}{4 \cdot \pi \cdot \lambda \cdot l_a} \cdot \left[\ln \left(\frac{4 \cdot \alpha \cdot t}{r_a^2} \right) + \frac{r_a^2}{4 \cdot \alpha \cdot t} - \frac{1}{4} \cdot \frac{r_a^2}{4 \cdot \alpha \cdot t} - \dots - \gamma \right] \quad (1)$$

onde rt é o tempo em (s), $\dot{Q}$ a potência dissipada como calor pela unidade de aquecimento em (W), γ constante de Euler e l_a o comprimento da unidade de aquecimento. Caso se verifique que $(r_a^2/4 \cdot \alpha \cdot t) \ll 1 \ll 1$ a equação 1 pode ser reescrita de forma simplificada como se apresenta na equação:

$$T(r_a, t) = \frac{\dot{Q}}{4 \cdot \pi \cdot \lambda \cdot l_a} \cdot \left[\ln t + \ln \left(\frac{4 \cdot \alpha}{r_a^2} \right) - \gamma \right] \quad (2)$$

A diferença de temperatura entre dois instantes t_1 e t_2 descrita pela equação:

$$T(t_2) - T(t_1) = \frac{\dot{Q}}{4 \cdot \pi \cdot \lambda \cdot l_a} \cdot \ln \left(\frac{t_2}{t_1} \right) \quad (3)$$

permite a determinação da condutividade térmica do material em análise. Para isso é necessário realizar leituras periódicas de temperatura que são registadas num gráfico semi-logarítmico como o apresentado na Figura 1. No eixo das ordenadas são colocados os valores das medições de diferença de temperatura (ΔT) e no das abcissas os valores de $\ln(t)$.

A condutividade térmica é então obtida resolvendo a equação 3 em ordem a λ :

$$\lambda = \frac{\dot{Q}}{4 \cdot \pi \cdot \Delta T \cdot l_a} \cdot \ln \left(\frac{t_2}{t_1} \right) \quad (4)$$

A equação 4 pode então ser reescrita substituindo $\ln \frac{(t_2/t_1)}{\Delta T} \frac{\ln(t_2/t_1)}{\Delta T}$ por $1/S$, sendo S o declive da reta de ajuste por regressão linear dos pontos que constituem a zona de medição, resultando:

$$\lambda = \frac{\dot{Q}}{4 \cdot \pi \cdot l_a} \cdot \frac{1}{S} \quad (5)$$

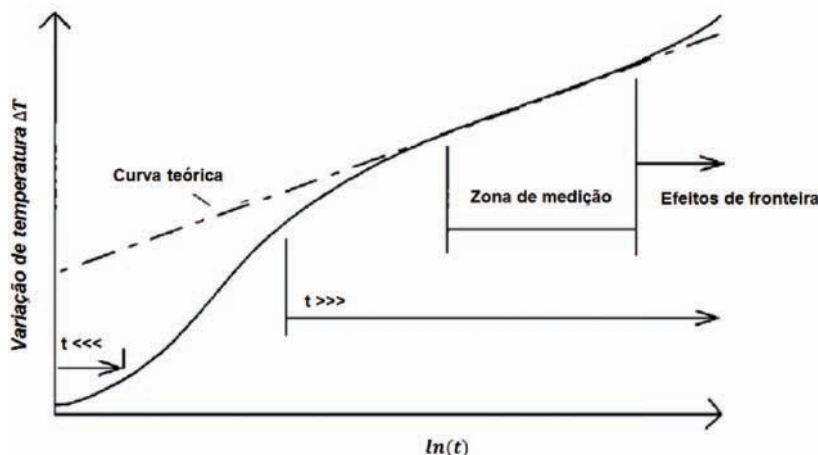


Fig. 1 – Gráfico Típico de um Ensaio pelo *Hot Wire Method*, adaptado de Presley e Christensen (1997)

O declive S a utilizar na equação 5 deve ser obtido através do Método dos Mínimos Quadrados (MMQ), devendo o ajuste por regressão linear simples ser realizado na zona de medição (Figura 1).

A reta de regressão a utilizar deve ser aquela onde se observe maior linearidade ao nível da curva experimental. A seleção da reta de regressão é feita através da realização de sucessivos ajustes por regressão linear simples, selecionando-se aquela cujo valor de R^2 seja maior.

A potência dissipada é determinada através da Lei de Joule, multiplicando a intensidade de corrente pela diferença de potencial nos terminais da unidade de aquecimento. A aplicação desta metodologia requer que durante os ensaios ambas as propriedades elétricas se mantenham sensivelmente constantes.

3.2 – Dispositivo utilizado

O sistema de ensaio utilizado apresenta-se na Figura 2. Inclui uma fonte de calor linear de *Constantan*, um termopar do tipo *T*, cobre-*Constantan*, um termómetro, uma câmara de ensaio, uma fonte de energia e três multímetros.

Os multímetros permitem a monitorização da intensidade de corrente fornecida pela fonte de energia (Amperímetro), da diferença de potencial estabelecida entre os extremos da fonte de calor (Voltímetro 1) e da diferença de potencial existente entre os dois extremos do termopar (Voltímetro 2). A câmara de ensaio encontra-se suspensa através da utilização de um suporte universal com o qual é possível também manter a sua verticalidade.

A montagem é simples, sendo, no entanto, fundamental assegurar bons contactos entre todos os fios existentes no circuito para que não ocorram, ou sejam mínimas, as oscilações na intensidade de corrente, resistência elétrica e na potência dissipada $\dot{Q}$. Por forma a minimizar estes problemas as

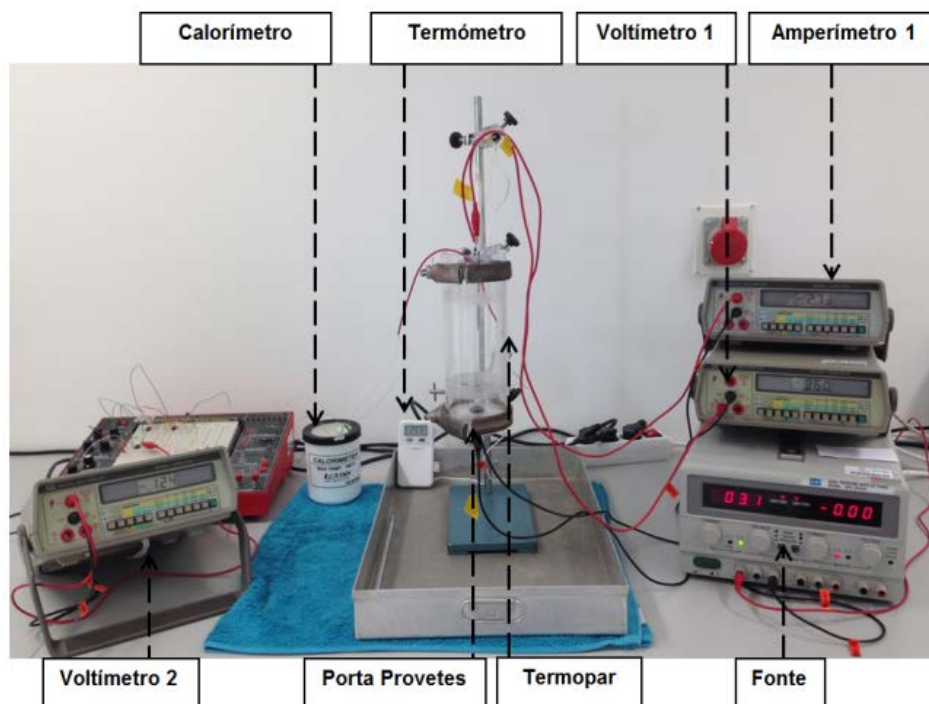


Fig. 2 – Dispositivo de ensaio montado para determinação da condutividade térmica (Lopes, 2014)

ligações entre os diferentes componentes do equipamento foram soldadas com solda quente de estanho.

A fonte de calor, ou unidade de aquecimento (Figura 3), constitui o componente do dispositivo com a qual é possível gerar calor. O material que a constitui deve apresentar baixa variação na sua resistência elétrica com o aumento de temperatura, por forma a possibilitar a determinação da potência dissipada. Na caracterização térmica realizada optou-se pela utilização de *Constantan*, uma liga metálica de cobre, níquel, manganês e ferro, que apresenta as características adequadas para a função.

A câmara de ensaio constitui o recipiente no interior do qual são colocados os materiais (solos) a ensaiar. Esta deve ser capaz de dissipar para o exterior a energia térmica proveniente da unidade de aquecimento que lhe é transmitida pelo solo. No seu interior, o fluxo de calor deve ser unicamente radial, o que se procura garantir pela utilização de materiais pouco condutores para a selagem do seu topo e base. No estudo apresentado optou-se por uma câmara desenvolvida pelos autores (Lopes, 2014), construída em aço inox e selada no topo e base por borracha sintética, com 6,5 cm de diâmetro e 21 cm de altura, que se mostra nas Figuras 4 e 5.

Os termopares permitem a medição de temperaturas de forma rápida e com precisão considerável. Podem ser de várias tipologias, tendo neste trabalho sido utilizado um tipo *T* composto por dois fios de cobre unidos a um de *Constantan* por enrolamento compacto. Uma das uniões é inserida em gelo fundente (junção de referência) e outra no interior do provete (junção de medição) o mais próximo possível da unidade de aquecimento (Figuras 3 e 5). A leitura da diferença de potencial é realizada utilizando um voltímetro e um circuito eletrónico para amplificação da diferença de potencial medida.

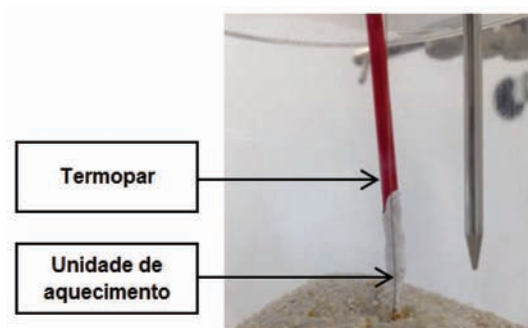


Fig. 3 – Pormenor do interior da câmara de ensaio, observando-se o termopar e a unidade de aquecimento.



Fig. 4 – Câmara em aço inoxidável utilizada no presente estudo



Fig. 5 – Pormenor do interior da câmara de ensaio

3.3 – Procedimento de ensaio

A realização dos ensaios com recurso ao HWM em solos não se encontra padronizada, existindo, contudo, algumas sugestões de autores no que se refere ao tempo de ensaio. Por forma a garantir os tempos de medição mínimos, optou-se pela fixação do tempo mínimo de ensaio em 3600s (1 hora). O estudo foi realizado em amostras de areia, descrita em 3.4, no estado seco por forma a garantir a invariabilidade deste parâmetro. Antes da realização de qualquer ensaio térmico, procedeu-se à calibração do termopar.

O procedimento de ensaio inicia-se com a secagem do solo na estufa durante 24h, sendo depois colocado no exsiccador até atingir a temperatura ambiente. A introdução do provete a ensaiar no interior da câmara de ensaio é realizada utilizando um funil de vidro, de forma a garantir a integridade da unidade de aquecimento. Durante o preenchimento da câmara são-lhe impressas pequenas vibrações de forma homogênea com o objetivo de reduzir o índice de vazios do material em estudo. O termopar e o termómetro são introduzidos sensivelmente a meia distância entre a base e o topo da unidade de aquecimento. O preenchimento é retomado até que o volume da câmara esteja completo. Finda a colocação do solo é fundamental proceder a uma inspeção visual antes do início de funcionamento do dispositivo, visando a correção da sua verticalidade e a avaliação do estado das ligações. O ensaio é então iniciado ligando a fonte de energia elétrica, devendo a potência descarregada para a unidade de aquecimento ser reduzida para que sejam garantidas pequenas perturbações no campo de temperaturas do provete.

3.4 – Caracterização da amostra ensaiada

Através da observação à lupa binocular, marca Olympus modelo SZ-40, a amostra revelou ser uma areia branca, fina a média, com classe de arredondamento entre o sub-arredondado a arredondado (segundo Pettijohn (1948)). É essencialmente constituída por quartzo translúcido a transparente, 75% a 80%, contendo ainda 2% a 5% de grãos de quartzo leitoso e cerca de 15% de grãos de feldspato. Além destas mineralogias, identificaram-se, também, em quantidades diminutas - até cerca de 1% - grãos de moscovite e minerais ferromagnesianos (anfíbolos e/ou piroxenas) (Figura 6).

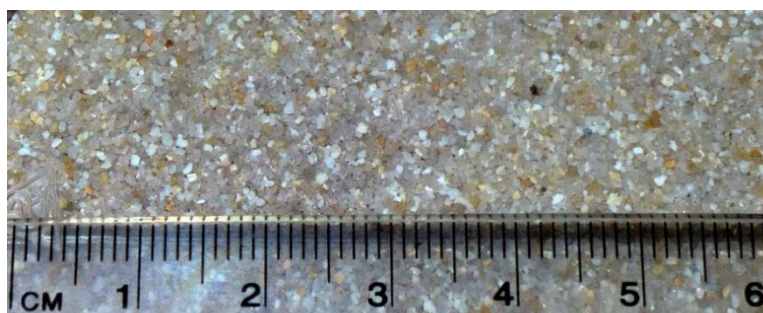


Fig. 6 – Areia siliciosa estudada

A classificação do solo foi realizada tendo por base ensaios de identificação. Estes iniciaram-se com a análise granulométrica por via seca e húmida, de onde se concluiu que o solo é maioritariamente constituído por partículas da dimensão das areias, cerca de 98%. Além desta dimensão, o solo exibe ainda cerca de 2% de partículas da dimensão dos siltes e/ou argilas. Os coeficientes de curvatura e uniformidade determinados foram de 1,17 e 2,03, respetivamente. Com base nos resultados anteriores o solo foi classificado segundo a Classificação Unificada de Solos como uma areia mal graduada SP.

Determinou-se, ainda, a densidade das partículas sólidas (G_s) para a qual se obteve o valor de 2,63. O teor em água foi determinado no final de cada ensaio térmico para confirmação do valor inicial de 0%.

3.5 – Resultados e discussão

Os resultados da caracterização térmica apresentam-se no Quadro 2. Para cada um dos ensaios, além da condutividade térmica, foi ainda determinado o índice de vazios, porosidade e peso volúmico. Além destes, expõe-se também o valor de coeficiente de correlação R^2 como indicador da qualidade do ajuste utilizado para a determinação de λ .

Os ajustes obtidos por regressão linear são válidos, tendo em qualquer caso sido atingido ou superado o valor mínimo requerido de coeficiente de correlação para a regressão linear ($R^2=0,990$). A variação da condutividade térmica, entre $0,368 \text{ W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$ e $0,497 \text{ W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$, é consistente com o esperado, ou seja, o incremento do peso volúmico resulta no aumento da condutividade térmica em virtude da permuta de parte do volume de ar por partículas sólidas (Figura 7).

Por forma averiguar a plausibilidade destes resultados, recorreu-se a dados existentes na bibliografia, confrontando-os com os valores obtidos experimentalmente. McCorry e Jones (2011) apresentam valores de condutividade para diferentes tipos de solos e rochas baseados na norma alemã VDI 4640 (2010), relativa ao projeto e dimensionamento de *Ground Source Energy Systems*. Segundo os autores, a condutividade térmica de referência para as areias secas situa-se no intervalo

entre $0,3 \text{ W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$ e $0,9 \text{ W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$, valores estes que englobam todos os resultados determinados e apresentados no Quadro 2.

Quadro 2 - Resultados obtidos pelo *Hot Wire Method* para a areia estudada

Ensaio	Índice de Vazios (<i>e</i>)	Porosidade (<i>n</i>) (%)	Peso Volúmico (<i>γ_d</i>) ($\text{kN}\cdot\text{m}^{-3}$)	Condutividade térmica (<i>λ</i>) ($\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$)	<i>R</i> ²
1	0,94	49	13,51	0,368	0,997
2	0,65	38	15,94	0,451	0,996
3	0,65	39	16,24	0,453	0,995
4	1,21	55	11,90	0,322	0,999
5	0,59	37	16,55	0,497	0,998
6	0,66	40	15,81	0,436	0,999
7	0,66	40	15,84	0,441	0,999
8	0,73	42	15,19	0,388	0,999

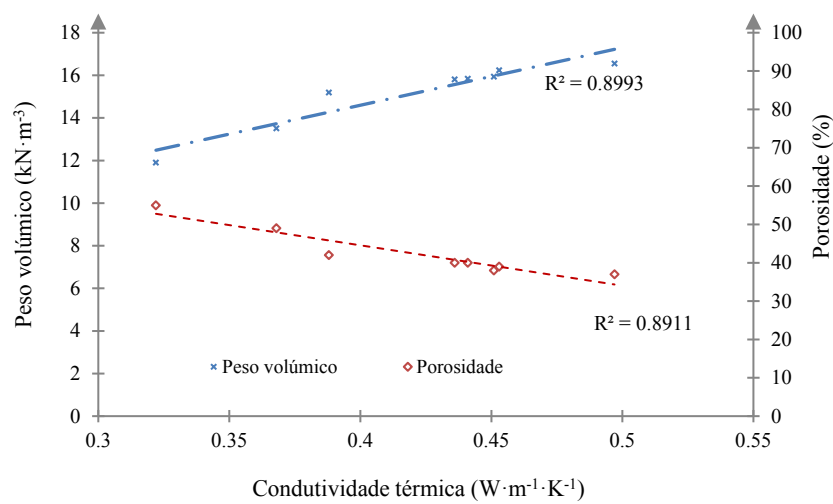


Fig. 7 – Relação entre a condutividade térmica e o peso volúmico e porosidade

4 – MODELAÇÃO NUMÉRICA

No âmbito do trabalho desenvolvido em Lopes (2014), foram efetuadas algumas séries de estudos de modelação numérica parte dos quais se apresentam em seguida. Nestes estudos de modelação foi estudado o comportamento térmico de um de solo homogéneo para diferentes cenários, para os quais se fizeram variar: as propriedades dos materiais envolvidos no modelo(estado seco e totalmente saturado), a ação térmica provocada pela variação anual de temperatura à superfície e a presença de uma estaca de fundação termoativa e respetivo carregamento térmico.

O estudo numérico foi dividido em duas fases. Uma primeira, onde se analisou unicamente a resposta do solo e a influência da variação de temperatura à superfície (condição para a qual existe solução analítica), e uma segunda, onde se estudou numericamente a influência conjunta da oscilação anual de temperatura à superfície (para diferentes cidades do território nacional) e do carregamento térmico imposto pela estaca termoativa no campo de temperaturas do solo. Para cada um dos cenários estudados foram realizadas análises distintas, onde se procurou avaliar a resposta do solo face às variações das suas propriedades térmicas, neste caso as decorrentes da variação do grau de saturação.

4.1 – Definição do modelo, propriedades gerais dos materiais, condições de fronteira e ação térmica

Os cálculos numéricos tiveram por base o método das diferenças finitas aplicado com recurso ao *software* *FLAC7.0*, módulo *Thermal*, desenvolvido pelo *Itasca Consulting Group* (2011).

O estudo numérico foi conduzido em condições de axissimetria (Figura 8), considerando o solo e o conjunto solo/estaca como meios homogêneos e isotrópicos. Recorreu-se a uma malha de 50m por 60m, cujo aspeto gráfico é ilustrado na Figura 9. Esta apresenta-se mais refinada junto aos limites esquerdo e superior porque aqui se desenvolvem os gradientes térmicos mais elevados durante as análises numéricas. No primeiro caso, por ser essa a zona de implantação da estaca, no segundo, devido à imposição neste limite da oscilação anual de temperatura à superfície. As restantes fronteiras do modelo, onde não são aplicadas as ações térmicas, são consideradas adiabáticas.

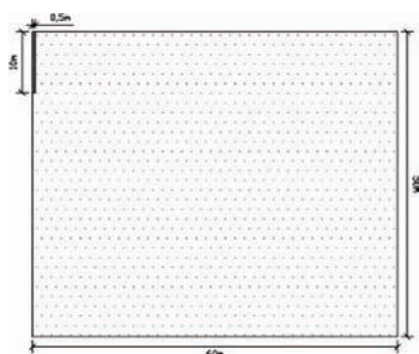


Fig. 8 – Modelo conceptual do cenário analisado

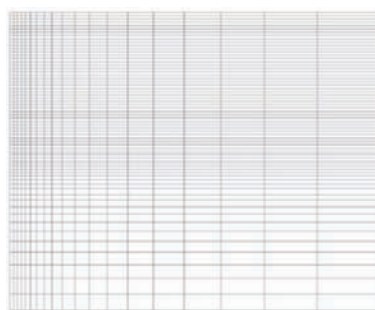


Fig. 9 – Malha utilizada para realização do estudo numérico

Para definição das ações térmicas na estaca e à superfície recorreu-se a uma função periódica, cuja formulação base se apresenta na equação:

$$T(t) = T_m + \Delta T \cdot \sin\left(\frac{2 \cdot \pi}{P} \cdot tX - \varepsilon_t\right) \quad (6)$$

onde T é a temperatura, T_m a temperatura média, ΔT a amplitude térmica, $\bar{P}$ o período de oscilação, t o tempo e ε_t a diferença de fase. A ação térmica na estaca varia em fase com a temperatura à superfície em torno do mesmo valor médio anual, porém com uma amplitude de variação superior. Com efeito, no verão há fluxo de calor do edifício para o terreno (fase de arrefecimento) pelo que a temperatura na estaca é superior à temperatura atmosférica injetando calor para o solo circundante. Por outro lado, no inverno, o sentido do fluxo térmico é o inverso, isto é, o fluxo térmico dá-se no sentido do solo para o edifício (fase de aquecimento). Os parâmetros utilizados para a definição de cada uma das ações térmicas apresentam-se no Quadro 3.

A definição das propriedades térmicas dos diferentes materiais constituintes do modelo teve por base ensaios laboratoriais, metodologias empíricas e dados disponíveis na bibliografia. A condutividade térmica do solo foi determinada utilizando os resultados experimentais obtidos nos ensaios número dois e três, e o seu calor específico através da média aritmética ponderada tal como se encontra definido em Brandl (2006) e Rees *et al.* (2000). Por fim, as propriedades térmicas do betão constituinte da estaca foram obtidas com base em valores da bibliografia disponíveis em Khan (2002). Estes valores correspondem à utilização de agregados em estados de saturação nula e total.

Quadro 3 - Parâmetros utilizados para definição das acções térmicas à superfície e na estaca

Acção Térmica	Localização	T_m (°C)	ΔT (°C)	$\bar{P}$ (anos)	ε_t (s)
Superfície	Lisboa	17,1*	4,0*	1	0
	Porto	14,65	1,85		
	Beja	16,55	6,05		
Estaca	-	17,1	9,0		

*fonte: <http://www.pordata.pt/Subtema/Portugal/Poluicao+Atmosferica+e+Clima-86>

No Quadro 4 apresentam-se em resumo os parâmetros introduzidos no modelo para as diferentes análises numéricas desenvolvidas. A definição das propriedades térmicas dos diferentes materiais constituintes do modelo teve por base ensaios laboratoriais, metodologias empíricas e dados disponíveis na bibliografia. A condutividade térmica do solo foi determinada utilizando os resultados experimentais obtidos nos ensaios número dois e três, e o seu calor específico através da média aritmética ponderada tal como se encontra definido em Brandl (2006) e Rees *et al.* (2000). Por fim, as propriedades térmicas do betão constituinte da estaca foram obtidas com base em valores da bibliografia disponíveis em Khan (2002). Estes valores correspondem à utilização de agregados em estados de saturação nula e total. No Quadro 4 apresentam-se em resumo os parâmetros introduzidos no modelo para as diferentes análises numéricas desenvolvidas.

Quadro 4 - Propriedades térmicas do betão e do solo

Meio	S _r (%)	Comprimento (L) (m)	Diâmetro (D) (mm)	Condutividade térmica (λ) (W·m ⁻¹ ·K ⁻¹)	Calor específico (c) (J·kg·K ⁻¹)
ESTACA	0	10	1000	2,03 ^{c)}	940 ^{c)}
	100			2,93	1257
SOLO	0			0,452 ^{b)}	882,88
	100			2,74 ^{c)}	2115,07

a) Obtido pelo método da média aritmética ponderada, b) Determinado em laboratório, c) Segundo Khan (2002)

A ação térmica anual foi aplicada em todas análises por um período de 4 anos, tendo-se partido de uma temperatura inicial uniforme e igual à temperatura média atmosférica do local em questão. Verificou-se que a distribuição sinusoidal das temperaturas apresentava variações muito reduzidas no segundo ano e, no terceiro, já estava estabilizada. Estes resultados podem também ser encontrados em Lopes (2014).

4.2 – Resultados e discussão

4.2.1 – Estudo numérico sem introdução de estrutura termoativa de fundação

Para o estudo numérico relativo à influência da variação anual de temperatura à superfície no solo em profundidade, apresentam-se nas Figuras 10 e 11 os perfis máximos e mínimos de temperatura obtidos para as cidades de Lisboa, Beja e Porto para os dois extremos de estado de saturação do meio e para uma ação térmica de período anual. As temperaturas médias anuais destas cidades são de 17, 1°C para Lisboa, 16,55°C para Beja e 14,65°C para o Porto. Refira-se que para este caso concreto – condução térmica devida a uma ação térmica num meio homogéneo semi-finito – existe uma solução analítica para a distribuição da temperatura em profundidade. Os resultados obtidos por via analítica (cuas expressões se podem encontrar, por exemplo em Brandl (2006), coincidem com os que resultaram das análises numéricas, permitindo validar os modelos numéricos.

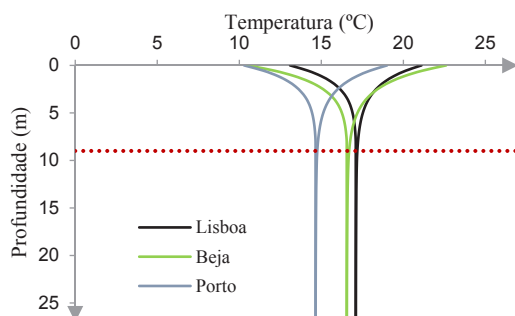


Fig. 10 – Perfis verticais de temperatura máxima e mínima, $S_r=0\%$

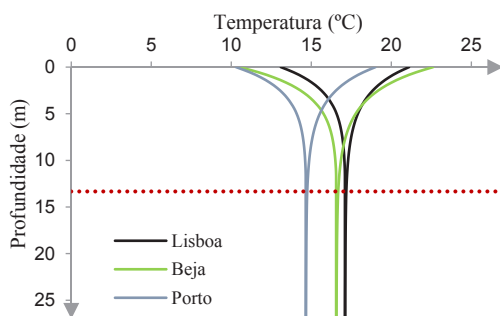


Fig. 11 – Perfis verticais de temperatura máxima e mínima, $S_r=100\%$

4.2.2 – Estudo numérico com introdução de uma estrutura termoativa de fundação

Para a cidade de Lisboa foram realizadas igualmente análises numéricas para estudo do comportamento térmico, considerando agora a presença de uma estaca termoativa com as características acima referidas, igualmente para condições de saturação total e nula.

Os campos de temperatura máxima e mínima ilustram-se nas Figuras 12 a 15, tal como os diferentes perfis verticais de temperatura a várias distâncias radiais à estaca que se apresentam nas Figuras 16 e 17. Para a profundidade de 10m, determinaram-se também os perfis horizontais de temperaturas máximas e mínimas (Figuras 18 e 19). Por fim, calculou-se com base nos resultados numéricos a função taxa de transferência de calor (Q) o que tornou possível a determinação da quantidade total de energia transferida entre o solo e a estaca.

As análises realizadas revelaram que, face ao carregamento imposto e às propriedades térmicas consideradas, o funcionamento da estrutura termoativa perturba o campo de temperaturas do solo até uma distância radial entre 5 e 7 m. Em profundidade, a variação de temperatura desenvolve-se desde a superfície e ao longo de toda a extensão do elemento de fundação, diminuindo em profundidade tal como esperado.

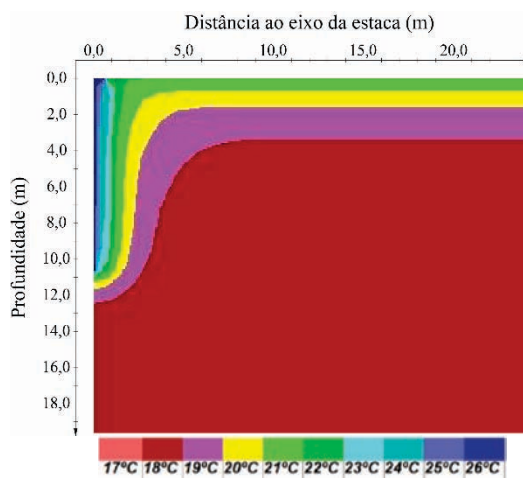


Fig. 12 – Campos de temperatura máxima $S_r=0$

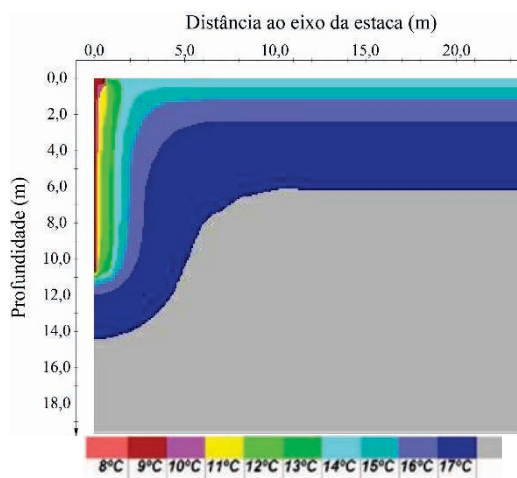


Fig. 13 – Campos de temperatura mínima $S_r=0$

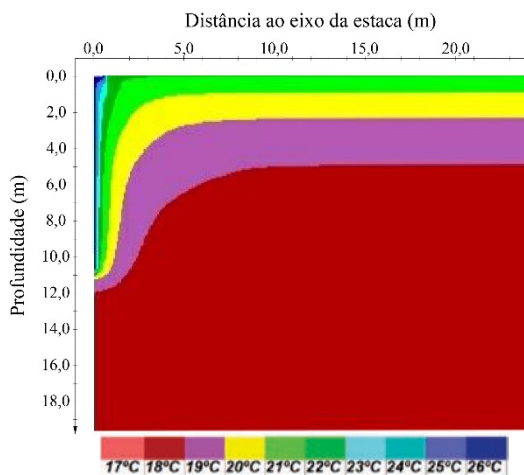


Fig. 14 – Campo de temperatura: máxima S_r
=100

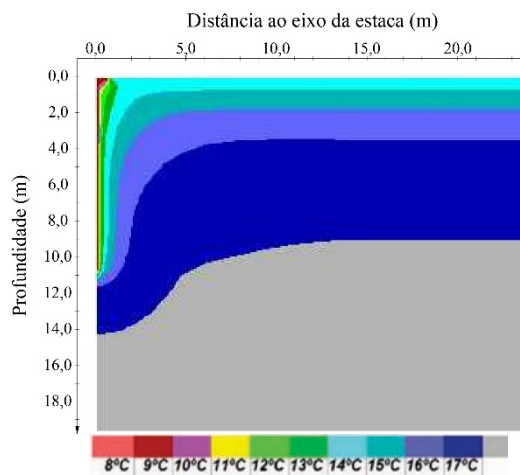


Fig. 15 – Campo de temperatura: mínima S_r
=100

Os perfis verticais de temperatura, Figuras 16 e 17, demonstram uma perturbação do campo de temperaturas maior para os casos de $S_r = 0\%$. Ou seja, apesar da distância de influência ser sensivelmente a mesma, a oscilação do campo de temperaturas sofre maiores variações no caso seco (perfis de temperatura mais abertos). Tal facto é explicado pela variação do calor específico do solo com o aumento de S_r . Isto é, comparativamente ao caso saturado, o solo seco apresenta um calor específico substancialmente menor, pelo que, apesar do solo seco ter maior dificuldade em transferir energia térmica, o seu calor específico também inferior torna-o mais suscetível a variações de temperatura, já que a quantidade de energia necessária para que este aumente um grau de temperatura é também menor (caso seco $882,9 \text{ J}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$ e caso saturado $2115,1 \text{ J}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$).

Em ambos os casos se verifica, tal como esperado, a convergência do campo de temperaturas para a temperatura média anual à superfície, ou seja, sensivelmente abaixo dos 15,0 m de profundidade a temperatura média do solo é de $17,5^\circ\text{C}$.

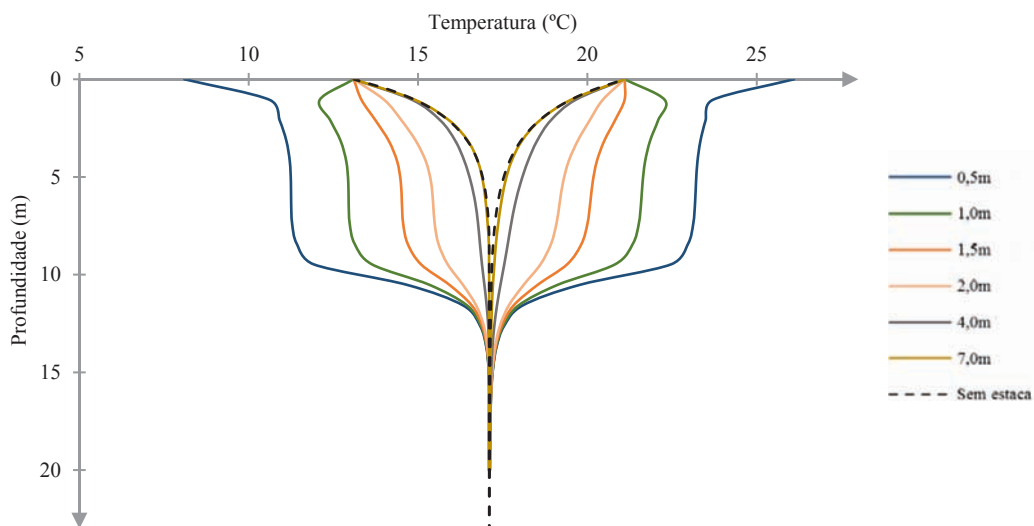


Fig. 16 – Perfis verticais de temperatura máximos e mínimo com introdução da estrutura termoativa para solo seco

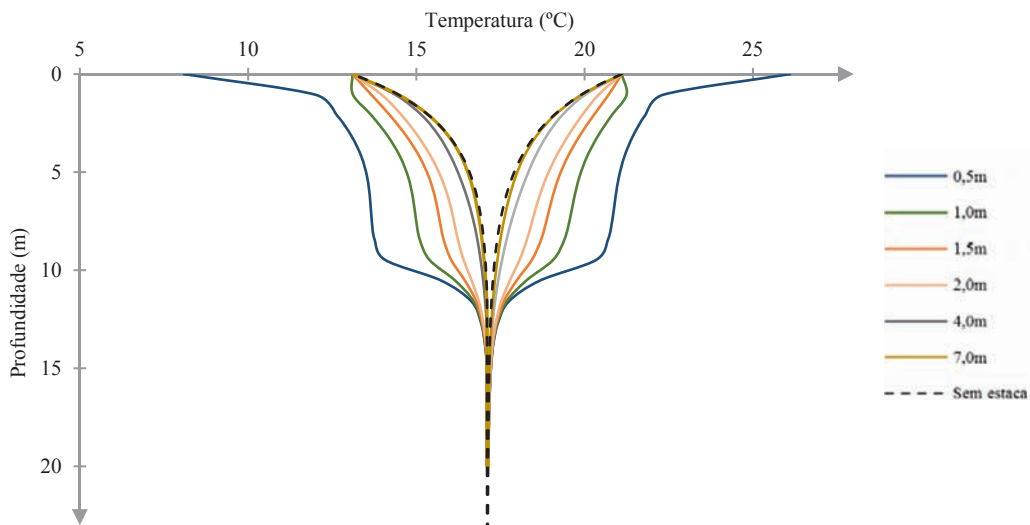


Fig. 17 – Perfis verticais de temperatura máximos e mínimo com introdução da estrutura termoativa para solo saturado

Nos perfis horizontais obtidos para $S_r=0$ (Figura 18) é constatável a interface solo estaca, materializada por um ressalto resultado do contraste entre as propriedades térmicas do betão e do solo. Tal facto não se observa no caso saturado em virtude da maior semelhança entre as propriedades térmicas dos dois materiais em análise (Figura 19). É por isso possível concluir que o processo de transferência de calor para em condições de total saturação é mais homogêneo. À semelhança do que se observa nos perfis verticais, também aqui se reconhece a convergência do solo para a temperatura média anual à superfície, 17,5°C, à medida que se aumenta a distância ao eixo da estrutura termoativa de fundação

Para as análises realizadas e apresentadas neste trabalho, foram também calculadas as quantidades totais de energia transferida pela estaca, que é de aproximadamente 1507 kW·h por ano (aproximadamente 6030 kW·h para um período de quatro anos). Estes valores foram obtidos integrando a função taxa de transferência de calor, no limite da estaca (Figura 20).

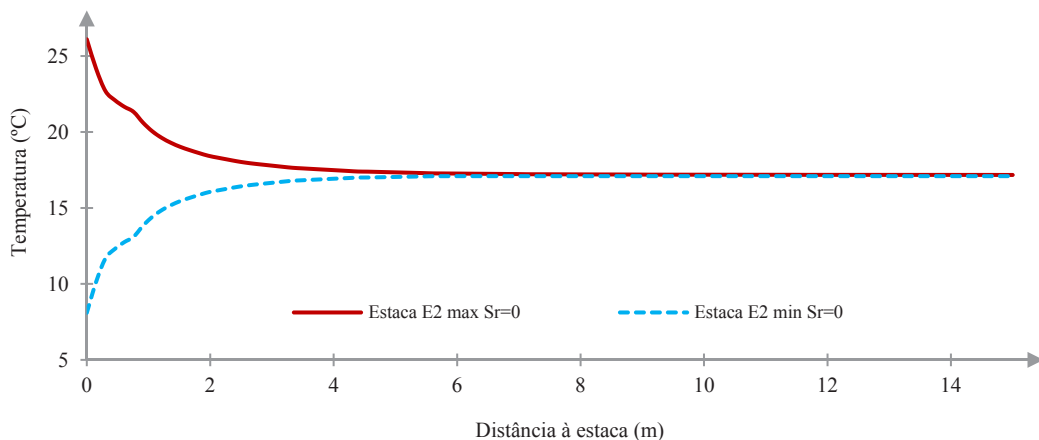


Fig. 18 – Perfis horizontais de temperatura a 10m de profundidade para solo seco

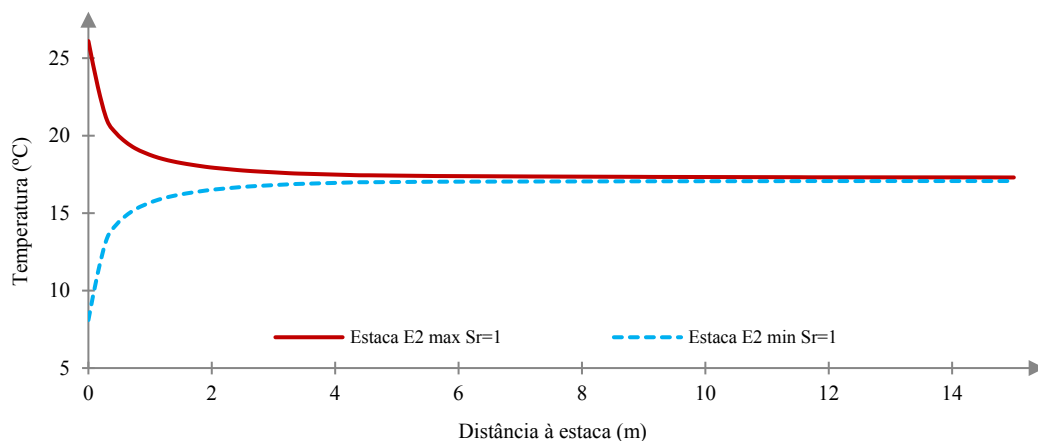


Fig. 19 – Perfis horizontais de temperatura a 10m de profundidade para solo saturado

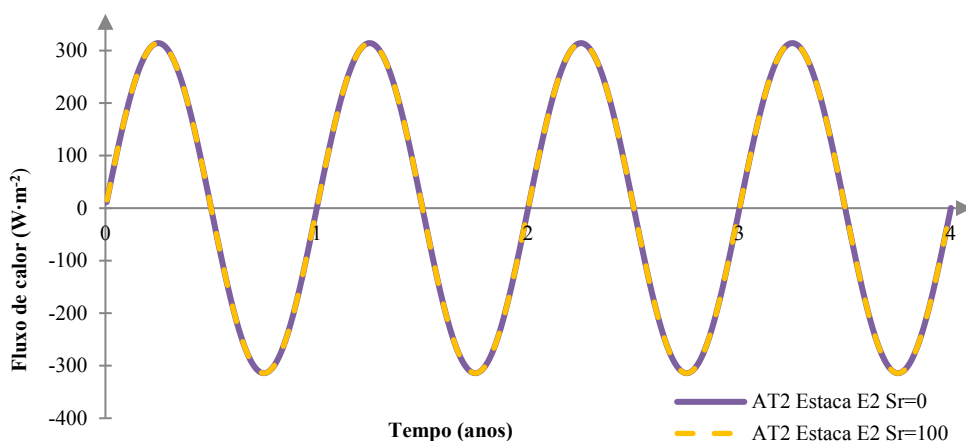


Fig. 20 – Função taxa de transferência de calor por condução

De recordar que estes valores correspondem à energia permutada por uma única estaca termoativa, os valores seriam superiores caso a transferência de calor fosse realizada através de grupos de estacas, devendo nesse caso ser tido em consideração o efeito de grupo.

5 – CONSIDERAÇÕES FINAIS

Neste trabalho são apresentados parte dos resultados dos estudos de caracterização térmica por via experimental de um solo arenoso e da modelação numérica de um meio homogêneo submetido à ação térmica conjunta da variação sazonal da temperatura atmosférica e de uma estaca termoativa em operação levados a cabo por Lopes (2014), no âmbito da sua Dissertação de Mestrado.

No que se refere à caracterização térmica, foram apresentados resultados para condições de solo seco utilizando o *Hot Wire Method*. Os resultados obtidos foram determinados recorrendo a ajustes que, em qualquer caso, superaram valores do coeficiente de regressão pelo MMQ de 0,990. Verificou-se, como esperado, um aumento da condutividade térmica com a redução do índice de vazios e aumento do peso volúmico. Os valores de condutividade térmica obtidos revelaram ser consistentes com valores disponíveis na bibliografia para solos arenosos.

No que concerne à modelação numérica, tal com referido, foram apenas apresentadas parte das análises numéricas efetuadas por Lopes (2014). Inicialmente testou-se o modelo na aplicação de uma onda sinusoidal no topo de um semi-estrato infinito, a que se fez equivaler a temperatura atmosférica aplicada à superfície do terreno. Nas análises subsequentes aplicou-se uma ação térmica numa estaca de fundação termoativa, em fase com a ação da temperatura atmosférica. Os resultados mostraram que as quantidades de energia transferidas entre o solo e a estaca e os campos de temperatura são dependentes do grau de saturação do solo, diâmetro da estaca, calor específico, condutividade térmica e ação térmica imposta.

Futuramente há que melhorar o dispositivo de ensaio por forma a realizar com fiabilidade ensaios para solos de outra natureza e para graus de saturação diferentes de zero. Quanto à modelação numérica, os estudos subsequentes devem necessariamente considerar o comportamento termomecânico, para deste modo avaliar qual a influência que injeção e extração de calor apresenta quer no solo quer no elemento estrutural (a estaca).

6 – AGRADECIMENTOS:

Os autores agradecem todo o apoio concedido pelo Laboratório Nacional de Engenharia Civil, Faculdade de Ciências e Tecnologias da Universidade Nova de Lisboa, Escola Superior de Tecnologia e Gestão do Instituto Politécnico de Beja e Fundação para a Ciência e Tecnologia através do projeto FCT PTDC/ECM-GEO/0728/2014 “Sustentabilidade de sistemas geotérmicos superficiais. Estudos aplicados a climas do sul da Europa.”

7 – REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Adam, D.; Markiewicz, R. (2009). *Energy from earth-coupled structures, foundations, tunnels and sewers*. Géotechnique, 59(3), 229–236.
- Banks, D. (2012). *An Introduction to Thermogeology: Ground Source Heating and Cooling*. Oxford, UK: Wiley-Blackwell. <http://doi.org/10.1002/9781118447512>
- Brandl, H. (2006). *Energy foundations and other thermo-active ground structures*. Géotechnique, 56(2), 81–122. <http://doi.org/10.1680/geot.2006.56.2.81>
- Carlslaw, H. S.; Jaeger, J. C. (1959). *Conduction of Heat in Solids*; Clarendon Press, Oxford Science Publications, UK, ISBN 0-19-853368-3.
- Çengel, Y. (2003). *Heat Transfer, A Practical Approach*; 2nd ed, McGraw-Hill, New York, USA, 853 p.
- Farouki, O.T. (1981). *Thermal properties of soils* (No. CRREL-MONO-81-1). Cold Regions Research and Engineering Lab Hanover NH.
- Franco, A. (2007). *An apparatus for the routine measurement of thermal conductivity of materials for building application based on a transient Hot-Wire Method*. Applied Thermal Engineering, 27 (14-15), 2495–2504.
- Healy, J. J.; de Groot, J. J.; Kestin, J. (1976). *The theory of the transient Hot-Wire Method for measuring thermal conductivity*. Physica 82C, 392–408.
- Hillel, D. (1998). *Environmental Soil Physics*; 2nd ed, Academic Press, London, UK, 225 p.
- Itasca (2011). *FLAC-Fast Lagrangean Analysis of Continua, Version 7.0 User's Manual*, Minnesota, Itasca Consulting Group.

- Khan, M. (2002). *Factors affecting the thermal properties of concrete and applicability of its prediction models*. Building and Environment, 37(6),607–614. [http://doi.org/10.1016/S0360-1323\(01\)00061-0](http://doi.org/10.1016/S0360-1323(01)00061-0)
- Laloui, L.; Di Donna, A. (2013). *Energy Geostructures: Innovation in Underground Engineering*; Wiley and Sons, London, UK, 304 p.
- Low, J.; Loveridge, F.; Powrie, W. (2015). *A comparison of laboratory and in situ methods to determine soil thermal conductivity for energy foundations and other ground heat exchanger applications*. Acta Geotechnica, 10, 209-218.
- Lowrie, W. (2007). *Fundamentals of Geophysics*; 2nd edition, Cambridge University Press, New York, USA, 393 p.
- Lopes, H. (2014). *Sistemas Geotérmicos de Baixa Entalpia-Estudos de Caracterização Térmica*. Dissertação de Mestrado em Engenharia Geológica, Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade Nova de Lisboa
- Lund, J.; Freeston, D.; Boyd, T. (2011). *Direct utilization of geothermal energy, 2010 worldwide review*. Geothermics, 40(3), 159–180.
- Madureira, P.; Antunes, P. (2012). *Geotermia de muito baixa entalpia. Razões e vantagens do seu aproveitamento*. Geonovas, 25, 27–33.
- McCorry, M.; Jones, G. (2011). *Geotrained Training Manual for Designers of Shallow Geothermal Systems*. Brussels: GEOTRAINET.
- Merckx, B.; Dudoignon, P.; Garnier, J. P.; Marchand, D. (2012). *Simplified Transient Hot-Wire Method for Effective Thermal Conductivity Measurement in Geomaterials: Microstructure and Saturation Effect*. Advances in Civil Engineering, 2012, 1–10.
- Nikolaev, I.V.; Leong, W.H.; Rosen, M.A. (2013). *Experimental investigation of soil thermal conductivity over a wide temperature range*. International Journal of Thermophysics, 34, 1110-1129.
- Pahud, D.; Hubbuch, M. (2007). *Measured thermal performances of the energy pile system of the dock midfield at Zurich Airport*, European Geothermal Congress.
- Pettijohn, F. (1948). *A preface to the classification of Sedimentary rocks*. The Journal of Geology, 56(2), 112–117.
- Presley, M.; Christensen, P. (1997). *Thermal conductivity measurements of particulate materials I. A review*. Journal of Geophysical Research, 102(E3), 6535–6549.
- Rees, S. W.; Adjali, M. H.; Zhou, Z.; Davies, M.; Thomas, H. R. (2000). *Ground heat transfer effects on the thermal performance of earth-contact structures*. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 4(3), 213–265. [http://doi.org/10.1016/S1364-0321\(99\)00018-0](http://doi.org/10.1016/S1364-0321(99)00018-0)
- VDI 4640 (2010) *Thermal Use of the Underground. Part 1: Fundamentals, approvals, environmental aspect*. Berlin: VDI-Gesellschaft Energie und Umwelt (GEU).
- Vieira, A.; Maranha, J. (2012). *Estudo de Modelação Numérica do Comportamento de Estruturas Termoactivas*. Atas do XIII Congresso Nacional de Geotecnia. doi10.13140/RG.2.1.2894.7368
- Williams, J.; Smith, M. (1989). *The Frozen Earth-Fundamentals of Geocryology*; Cambridge University Press, New York, USA, 323 p.

ESTUDO DOS MECANISMOS DE COMPACTAÇÃO EM MISTURAS ENTRE SOLO ARENOSO E ALTOS TEORES DE EMULSÃO ASFÁLTICA

Study of the Compaction Mechanism in Mixtures of Sandy Soil and High Asphalt Emulsion Contents

Fabiola Costa de Lima ^a, Silvrano Adonias Dantas Neto ^a

^a Departamento de Engenharia Hidráulica e Ambiental, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza-CE, Brasil.

RESUMO – Este artigo apresenta uma avaliação dos mecanismos de compactação de misturas entre solo arenoso e altos teores de emulsão asfáltica. Para tanto, foram utilizados um solo classificado pelo Sistema Unificado de Classificação dos Solos como SP e uma emulsão asfáltica catiônica de ruptura lenta (RL-1C). As misturas entre solo e emulsão asfáltica foram confeccionadas com teores de emulsão entre 13% e 31%, em peso, e foram submetidas a diferentes condições de compactação, de forma que as informações obtidas permitissem a identificação dos mecanismos que governam a sua compactação, bem como a identificação da metodologia de compactação mais apropriada para este tipo de material. Os resultados mostraram que os mecanismos responsáveis pela compactação das misturas entre solo e altos teores de emulsão asfáltica são significativamente diferentes daqueles que regem a compactação dos solos granulares e finos. A rigidez do filme betuminoso apresentou-se como o parâmetro com maior influência na compactação das misturas estudadas, mostrando que para a obtenção de uma compactação eficiente é necessária a diminuição da viscosidade do ligante asfáltico, que pode ser feita pelo aumento da energia, ou aumento da temperatura do ligante no momento da compactação.

ABSTRACT – This paper presents an evaluation of the mechanisms which define the compaction of mixtures between sandy soil and high asphalt emulsion contents. A sandy soil classified according to the Unified Soil Classification System as SP and a cationic asphalt emulsion slow set (RL-1C) were used. The mixtures between soil and asphalt emulsion were manufactures with asphalt emulsion contents varying from 13% to 31%, in weight, and were compacted under different conditions, in order to allow the identification of the mechanisms responsible for their compaction, and compaction methodology suitable for this material. Results show that the mechanisms governing the compaction of mixtures between soil and high asphalt emulsion contents are significantly different from those ones regarding the granular and fine soils. The stiffness of the residual asphalt binder on the soil particles presents itself as the most important factor that has influenced the compaction of the studied mixtures, indicating that to obtain an efficient compaction of the mixtures it is necessary to increase the energy used in the compaction process or decreasing the viscosity of the residual binder by heating during the compaction procedure.

Palavras Chave – solo-emulsão, compactação, emulsão asfáltica.

Keywords – soil-emulsion, compaction, asphalt emulsion.

1 – INTRODUÇÃO

Suarez (2008) apresenta o solo-emulsão como um material resultante de um processo de estabilização pelo qual as propriedades do solo são supostamente melhoradas por meio da

E-mails: fabiola-cl@gmail.com (F. Lima), silvrano@ufc.br (S. Neto)

incorporação da emulsão asfáltica visando à melhoria das características mecânicas da mistura resultante quando comparada ao material granular. Tomando-se por base este princípio, observa-se que a estabilização dos solos mediante a adição das emulsões asfálticas pode ser aplicada na construção de diferentes tipos de obras geotécnicas, como por exemplo, barragens de aterro, estradas e aeroportos, nas quais o aproveitamento do solo local, nem sempre com as propriedades mecânicas satisfatórias, é importante para a redução das distâncias de transporte. Em geral, esse tipo de estabilização busca a melhoria das propriedades mecânicas e físico-químicas dos solos.

Na pavimentação, diversas pesquisas sobre estabilização de solos com emulsão asfáltica são reportadas (Pessoa, 2004; Miceli Júnior, 2006; Soliz, 2007; Gondim, 2008; Sampaio, 2008; Rebelo, 2009; Sant'ana, 2009; Pacheco, 2011; Linsha et al., 2016). Verma (2015) menciona que existem poucas pesquisas relacionadas à estabilização de solos com emulsão asfáltica. Estes autores citam como principais vantagens da estabilização dos solos com emulsão asfáltica: aumento da durabilidade e impermeabilização das camadas; ação coesiva promovida pelo ligante asfáltico ao material granular, aumentando a sua resistência; e capacidade de resistir às ações de ácidos, sais e álcalis. Além disto, estes autores citam que a formação do filme betuminoso residual nos grãos de solo, formado após a ruptura da emulsão asfáltica, confere à mistura solo-emulsão um aumento da resistência e flexibilidade se comparado ao comportamento das camadas granulares. Isto faz com que os estudos da estabilização dos solos com emulsão asfáltica com o objetivo de se aumentar a capacidade de suporte e a durabilidade das camadas de pavimento estejam, de certo ponto, avançados, apesar de se concentrarem no estudo de propriedades como a capacidade de suporte, avaliada por meio do Índice de Suporte Califórnia, resistência à compressão simples e módulo resiliente.

Jacintho (2005, 2010) apresentou estudos sobre o comportamento das misturas solo-emulsão com ênfase em suas propriedades de resistência ao cisalhamento, permeabilidade e deformabilidade. Este autor, assim como outros já citados anteriormente, trabalharam com teores de emulsão asfáltica normalmente inferiores a 10%, em peso, e os resultados obtidos podem ser considerados inconclusivos, uma vez que não mostram de forma clara, a melhoria promovida nas propriedades dos solos pela adição da emulsão asfáltica. Assim sendo, torna-se necessário o estudo mais aprofundado do comportamento das misturas solo-emulsão, considerando a possibilidade da adição de teores de emulsão asfáltica mais elevados que aqueles considerados até o presente momento nos diferentes trabalhos realizados sobre o tema.

Por se tratar de um material inteiramente novo para emprego em obras geotécnicas, a mistura solo-emulsão, ao se apresentar como um compósito, pode apresentar mecanismos de compactação diferentes daqueles responsáveis pela compactação dos solos, sendo necessário, antes de estudar qualquer propriedade geotécnica, a definição da técnica de compactação e da metodologia de dosagem mais adequada, especificamente, quando utilizados elevados teores de emulsão asfáltica, como é o foco principal deste trabalho. Desta forma, este trabalho tem por objetivo a avaliação do processo de compactação das misturas de solo com elevados teores de emulsão asfáltica, de forma a permitir o entendimento dos principais fatores responsáveis pelo mecanismo de compactação deste tipo particular de material. O estudo concentra-se no estudo da metodologia de compactação e na influência da viscosidade do filme betuminoso formado sobre os grãos de solo nas propriedades físicas e na estrutura das misturas entre solo e emulsão asfáltica confeccionadas com teores de emulsão asfáltica variando de 13% a 31%, em peso.

2 – ESTABILIZAÇÃO DE SOLOS COM MATERIAIS ASFÁLTICOS

Ferreira (1980) apud Gondim (2008) relata que a estabilização betuminosa de solos começou a ser empregada quando engenheiros rodoviários, trabalhando nas proximidades de campos petrolíferos, notaram que ao espalharem óleo cru sobre as estradas de terra conseguiram reduzir o pó existente, tornando-as mais aptas a resistirem aos rigores do tráfego e do intemperismo. Essa

prática começou a ser difundida e aprimorada por meio da substituição do óleo cru pelo petróleo destilado.

Thuller (2005) relata que na rodovia RJ-148, situada no estado do Rio de Janeiro no Brasil, a camada de base foi construída com solo-emulsão por volta de 1979, e que mesmo após os primeiros 6 meses sem qualquer tipo de revestimento, ou proteção, a mesma apresentou um ótimo comportamento, recebendo posteriormente apenas um tratamento com lama asfáltica. A Figura 1 ilustra o estado de conservação do pavimento da rodovia RJ-148 após 25 anos de utilização, mesmo após a completa degradação da camada de revestimento, mostrando o ganho de durabilidade promovida pela estabilização da base com a adição da emulsão asfáltica (Thuller, 2005).



Fig. 1 – Estado de conservação da rodovia da RJ-148 construída em 1979 com base de solo-emulsão (Thuller, 2005).

Soliz (2007) relata que estabilização dos solos com materiais asfálticos começou com a utilização do asfalto diluído de cura rápida e média, já que as emulsões asfálticas catiônicas foram colocadas à disposição do mercado somente em 1951 pela empresa Esso, na França. No Brasil, em 1952, a Shell lançou as emulsões aniônicas e somente dez anos mais tarde apareceram no mercado as emulsões catiônicas. Já as pesquisas sobre a estabilização de solos com asfalto diluído, na década de 50 e início da década 60, não forneceram informações suficientes que permitissem estabelecer especificações e normas para as misturas solo-betume e somente em 1976, no Brasil, foi iniciado um programa de construções de rodovias de baixo custo, no qual foi incluído o estudo de estabilização dos solos pela adição das emulsões asfálticas.

A principal função do material asfáltico na mistura solo-emulsão é conferir ao solo estabilizado coesão, pela ação do ligante asfáltico, e diminuir a permeabilidade do solo. Segundo Sant’ana (2009), a elevação da resistência do solo arenoso pela estabilização solo-emulsão está relacionada ao aumento da coesão entre partículas promovida pelo filme betuminoso que as envolve além do atrito já existente. Porém, acima de determinado teor de asfalto, ocorre o aumento do espessamento do filme que envolve as partículas de solo, afastando-as, e promovendo a perda de resistência ao cisalhamento devido ao menor atrito interno. A impermeabilização dos solos, promovida pelo material asfáltico, se dá pela diminuição dos vazios do solo, impedindo o fluxo de água, ou pela formação do filme betuminoso que protege as partículas da ação da água, ou ainda, pela ação conjunta destes dois mecanismos (Sant’ana, 2009).

Observa-se que a formação deste filme betuminoso é de fundamental importância para a estabilização do solo. Dentre os principais fatores que influenciam na eficiência da formação do

filme betuminoso podem ser citados a viscosidade e o tempo de ruptura da emulsão asfáltica e as características de adesividade entre o asfalto residual e os grãos minerais. A ruptura da emulsão ocorrendo antes de um total envolvimento das partículas de solo pelo material betuminoso, resultará na formação de grumos constituídos pelo asfalto residual e pela fração mais fina do solo, conforme observado nos resultados apresentados por Jacintho (2010) e mostrados na Figura 2. Pode considerar-se que a formação de grumos no interior da mistura solo-emulsão prejudica o processo de estabilização, pois confere à estrutura uma maior heterogeneidade, e pode, em muitos casos, aumentar o volume de vazios, levando a um aumento indesejado da permeabilidade do solo, ou até mesmo, à diminuição na sua resistência ao cisalhamento, como ocorreu em alguns dos resultados apresentados por Jacintho (2010). O fato de a ruptura da emulsão asfáltica ocorrer antes, ou após, o completo envolvimento dos grãos minerais do solo deve ser considerado de extrema importância no estudo das misturas solo-emulsão, e a interação química entre os grãos de solo e a emulsão desempenha um papel primordial neste processo. Dependendo dos componentes químicos presentes na mistura, eles podem funcionar como catalizadores do processo de coalescência da emulsão, acelerando a união entre os glóbulos de asfalto dispersos no emulsificante, e, portanto, influenciando a adesividade do betume aos grãos de solo, a qual é de fundamental importância no processo de estabilização.

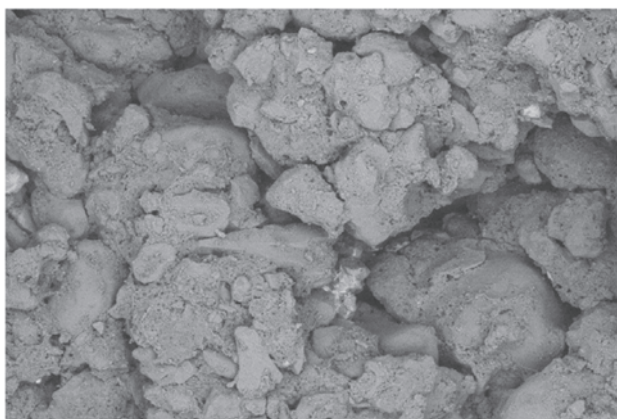


Fig. 2 – Microscopia eletrônica em mistura solo-emulsão confeccionada com adição de 8%, em peso, de emulsão asfáltica a um solo classificado como uma areia siltosa (Jacintho, 2010).

De uma forma geral, observa-se que a maioria das aplicações e estudos sobre a estabilização solo-emulsão concentram-se na área de pavimentação (Nascimento *et al.*, 2003; Pessoa, 2004; Miceli Júnior, 2006; Gouveia *et al.*, 2007; Soliz, 2007; Gondim, 2008; Sampaio, 2008; Suarez, 2008; Rebelo, 2009). Estudos relacionados ao comportamento das misturas solo-emulsão para fins de execução de barragens são poucos, destacando-se, apenas, os trabalhos de Jacintho (2005, 2010). Observa-se que em todos estes estudos citados, os máximos teores de emulsão asfáltica adicionados aos mais diferentes tipos de solo, visando a sua estabilização, foram da ordem de 8%, em peso, e que os resultados foram muitas vezes inconclusivos a respeito do ganho promovido no comportamento dos materiais pela adição da emulsão asfáltica, o que pode ser atribuído à formação dos grumos na estrutura da mistura solo-emulsão, conforme já discutido anteriormente.

Do ponto de vista de compactação em laboratório, observa-se que em todos os estudos citados anteriormente foi utilizada a metodologia Proctor em diferentes energias. Como os teores de emulsão asfáltica utilizados foram baixos, menos que 10% em peso da mistura, a fase sólida formada pelo solo ainda predomina no controle do mecanismo de compactação das misturas solo-emulsão, o qual ainda é altamente influenciado pelo teor de umidade do material. Dantas Neto *et al.* (2016) iniciaram o estudo do comportamento das misturas solo-emulsão com teores de emulsão

asfáltica variando de 13% a 31%, em peso. Estes autores apresentaram um estudo do processo de compactação das misturas formadas a partir da adição de uma emulsão asfáltica do tipo RL-1C a um solo classificado como uma areia siltosa (SM). Os estudos consistiram na avaliação da energia de compactação (Proctor normal e modificada) e da viscosidade do ligante asfáltico (misturas compactadas imediatamente, e após 24 horas da confecção das misturas), e mostraram que para as misturas com elevados teores de asfalto, os mecanismos de compactação das misturas são bastante diferentes daqueles responsáveis pela compactação dos materiais granulares, ou mesmo das misturas solo-emulsão, com teores de emulsão inferiores a 10%, em peso.

Os resultados apresentados por Dantas Neto *et al.* (2016) mostraram ainda que a rigidez do filme asfáltico formado exerce grande influência no processo de compactação das misturas solo-emulsão, sendo a eficiência da compactação obtida apenas para situações nas quais a viscosidade da emulsão foi significativamente baixa (compactação antes da ruptura da emulsão), ou com o aumento da energia de compactação. Além disto, estes autores mostraram que para misturas solo-emulsão com elevados teores de emulsão asfáltica, parâmetros físicos como a massa específica aparente seca e a umidade ótima, tradicionalmente utilizados nos estudos de compactação dos solos granulares e finos, não devem ser aplicados nos estudos de compactação e dosagem das misturas solo-emulsão com elevados teores de emulsão, conforme ilustrado na Figura 3, para misturas compactadas imediatamente (PNI), e 24 horas (PN24) após a mistura entre o solo e a emulsão asfáltica. Ao invés disto, a utilização dos parâmetros físicos como massa específica aparente (Figura 4), percentagem de volume de vazios (Figura 5), e percentagem de volume de vazios em relação à estrutura de grãos minerais (Figura 6) podem ser utilizados para melhor representar a influência da adição da emulsão asfáltica nas características de compactação das misturas solo-emulsão (Figura 4). Lima (2016) apresenta uma descrição detalhada a respeito da definição e cálculos destes parâmetros físicos, os quais são também utilizados no presente trabalho para a avaliação do processo de compactação das misturas solo-emulsão estudadas.

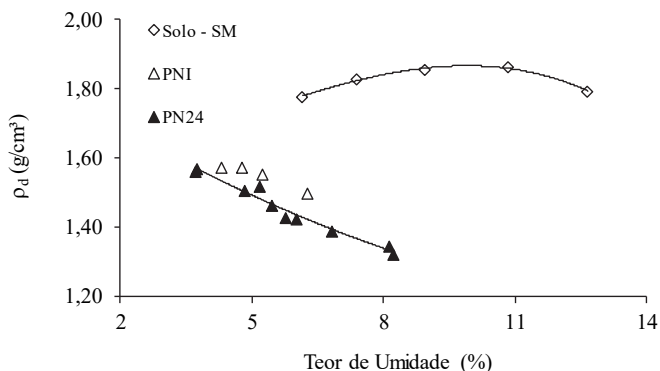


Fig. 3 – Variação da massa específica aparente seca com o teor de umidade para a compactação na energia Proctor normal (Dantas Neto *et al.*, 2016).

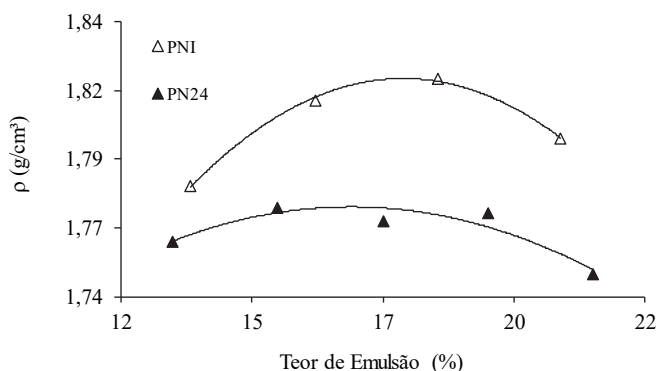


Fig. 4 – Variação da massa específica aparente com o teor de emulsão asfáltica para a compactação na energia Proctor normal (Dantas Neto *et al.*, 2016).

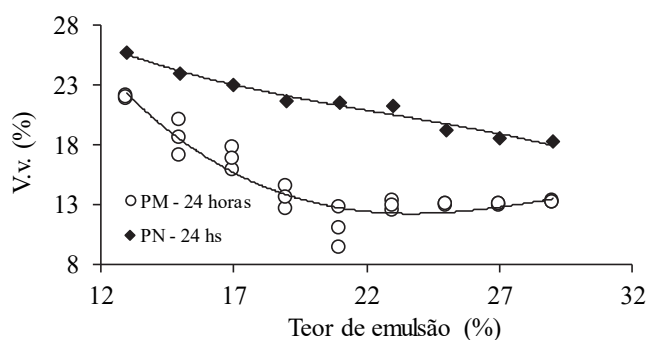


Fig. 5 – Variação da porcentagem de vazios com o teor de emulsão para misturas solo-emulsão compactadas nas energias Proctor normal (PN) e modificado (PM) (Dantas Neto *et al.*, 2016).

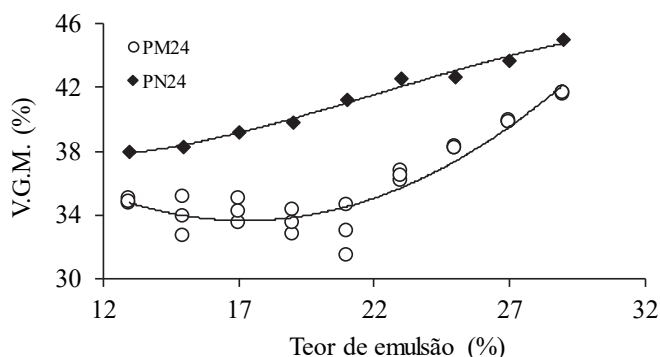


Fig. 6 – Variação da porcentagem de vazios em relação aos grãos minerais (VGM) com o teor de emulsão para misturas solo-emulsão compactadas nas energias Proctor normal (PN) e modificado (PM) (Dantas Neto *et al.*, 2016).

3 – MATERIAIS E MÉTODOS

3.1 – Solo utilizado na confecção das mistura solo-emulsão estudadas

Para a confecção das misturas solo-emulsão estudadas neste trabalho foi utilizada uma amostra de solo coletada no Campus da Universidade Federal do Ceará – Universidade Federal do Ceará, no local de coordenadas 3°44'42.8"S 38°34'40.3"W (datum: SIRGAS 2000), na cidade de Fortaleza - CE. Os ensaios executados para a caracterização física da amostra de solo utilizada foram: limite de liquidez (ABNT, 1984a), limite de plasticidade (ABNT, 1984b), granulometria por peneiramento e sedimentação (ABNT, 1984c), massa específica dos sólidos (ABNT, 1984d) e compactação Proctor (ABNT, 1986).

As Figuras 7 e 8 apresentam a curva granulométrica e curva de compactação do solo, respectivamente. No Quadro 1 é apresentado um resumo dos resultados obtidos nos ensaios de caracterização realizados no solo utilizado para a confecção das misturas solo-emulsão estudadas e a classificação do solo de acordo com o Sistema Unificado de Classificação dos Solos (SUCS). De acordo com os resultados obtidos nos ensaios de caracterização, o solo foi classificado como uma areia siltosa (SM) não plástica. Este tipo de material normalmente não apresenta características de resistência, deformabilidade e estanqueidade suficiente para emprego em muitos tipos de obras geotécnicas, sendo, portanto, um material muito indicado para verificar os benefícios do processo de estabilização proporcionado pela adição da emulsão asfáltica.

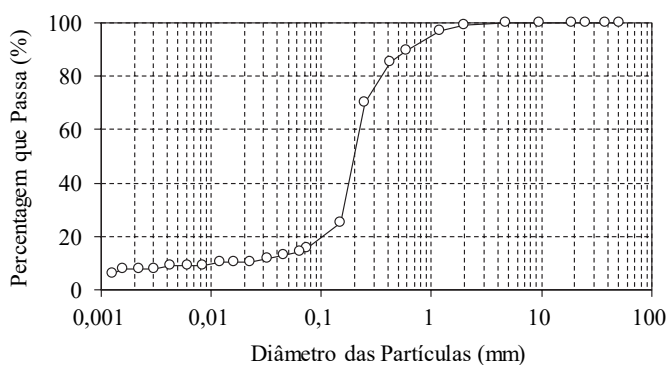


Fig. 7 – Curva granulométrica do solo.

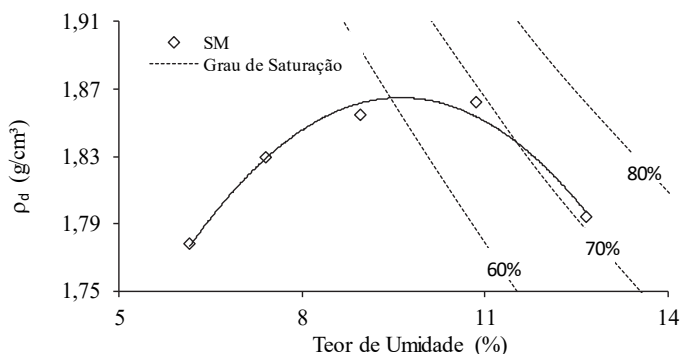


Fig. 8 – Curva de compactação do solo.

Quadro 1 – Propriedades físicas do solo.

Parâmetro	Valor
Peso específico aparente seco máximo (kN/m ³)	18,6
Umidade ótima (%)	9,7
Limite de liquidez (%)	Não apresentou
Índice de plasticidade (%)	-
Densidade relativa dos grãos	2,64
Classificação SUCS	SM

3.2 – Caracterização química do solo

A caracterização química foi realizada no Laboratório de Solos e Água do Departamento de Ciências do Solo do Centro de Ciências Agrárias da Universidade Federal do Ceará. Esta caracterização teve o objetivo de verificar a composição química do solo utilizado na confecção das misturas solo-emulsão, de forma a fornecer resultados que possam explicar a interação grão mineral vs. material asfáltico expressa pela adesividade solo-betume, que é importante no entendimento do comportamento das misturas solo-emulsão. Foram determinadas para o solo as seguintes características: pH em água, pH em KCl, teor de matéria orgânica (MO), soma dos cátions trocáveis (S), capacidade de troca catiônica (CTC), saturação de alumínio (%Al) e saturação de bases (%V), seguindo os procedimentos estabelecidos pela Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária - EMBRAPA (1997).

No Quadro 2 são apresentados os resultados dos ensaios de caracterização química do solo estudado. De acordo com os resultados obtidos, o solo apresentou baixo valor de CTC (3,8 cmolc/kgm), indicando que o mesmo possui baixa capacidade de reter cátions. Segundo o Boletim técnico de Interpretação de Análise de Solo da ANDA (1992), o valor CTC = 3,8 cmolc/kgm é característico de solos que possuem uma das seguintes características: alta percentagem de quartzo, baixo teor de matéria orgânica, menor capacidade de reter umidade, e que são levemente ácidos.

Quadro 2 – Resultados das análises químicas no solo.

Macronutrientes								
Ca ²⁺ *	Mg ²⁺ *	Na ⁺ *	K ⁺ *	H ⁺ + Al ³⁺ * *	Al ³⁺ *	P (mg/kg)	C (g/kg)	N (g/kg)
1,40	1,10	0,24	0,11	0,99	0,10	10	5,04	0,47
Propriedades químicas								
pH			Matéria org. (g/kg)	S *	CTC *	%Al (%)	%V (%)	
Água	KCl	ΔpH						
5.6	5.1	-0.5	8.69	2.9	3.8	72	76	

*Valores em cmolc/kgm

De acordo com os valores de pH em água (5,6) e em KCl (5,1), o solo ensaiado pode ser considerado ácido em solução de KCl 1N e moderadamente ácido em água, o que evidencia um possível potencial baixo de floculação natural do solo (ANDA, 1992). Um valor de ΔpH negativo indica que grande parte da quantidade de alumínio presente na amostra é trocável, o que é confirmado pelo valor da %Al igual a 72%. Outro fator a considerar é que quanto mais negativo for o ΔpH, menor será o predomínio de óxidos de ferro e de alumínio presentes na amostra de solo, sendo a presença destes compostos importante, uma vez que os mesmos são considerados

facilitadores da estabilização asfáltica (Jacintho, 2010), . Sendo assim, pode afirmar-se, que segundo o resultado apresentado (ΔpH igual a -0,5), o solo utilizado na confecção das misturas estudadas apresenta moderada facilidade de estabilização.

3.3 – Caracterização mineralógica do solo

3.3.1 – Fluorescência de raios X

A fluorescência de raios X é uma técnica de análise quantitativa e qualitativa da composição química do material, e baseia-se na absorção de energia por parte dos átomos, provocando uma excitação, que é seguida de uma liberação de radiação secundária chamada de fluorescência. Os raios liberados pelos átomos têm um comprimento de onda associado a cada elemento químico de acordo com a sua proporção presente na amostra. Os resultados deste ensaio serão usados principalmente para auxiliar o processo de identificação dos minerais utilizando o programa *X'Pert High Score Plus* em conjunto com os resultados da difratometria de raios X. Esse ensaio foi executado no Laboratório de Raios X do Departamento de Física da Universidade Federal do Ceará, utilizando o equipamento *RigaKu (ZSX Mini II)*. No Quadro 3 são apresentados os resultados da caracterização química do solo utilizado na confecção das misturas solo-emulsão obtidos a partir dos ensaios de fluorescência de raios X.

Quadro 3 – Elementos químicos presentes na composição do solo utilizado na confecção das misturas solo-emulsão.

Si *	Al *	Fe *	K *	Ti *	Ca *	Zr *	S *
86,246	5,9203	3,2949	2,2920	1,0052	0,9772	0,1730	0,0911

* Percentagem em massa

3.3.2 – Difração de raios X

Segundo Silva (2013), a difração de raios X (DRX) é uma técnica baseada na incidência de radiação X na amostra, permitindo a definição da forma básica dos cristais, as distâncias interatômicas e as fases cristalinas. Diferente da radiação gama e das radiações corpusculares (alfa, beta, nêutrons, etc.), que são geradas nos núcleos atômicos e que podem ser obtidos naturalmente por decaimento radioativo de radionuclídeos, os raios X são provenientes da camada eletrônica dos átomos e são, em geral, obtidos por meio de tubos que promovem a produção da radiação X. Esses tubos consistem basicamente em um cilindro a vácuo contendo um anodo fixo ou giratório. Os valores de comprimento de onda das radiações características dependem do material do qual o anodo é feito. Após colidirem com o material, os raios X mudam a sua direção de propagação (difração), porém, mantêm o comprimento de onda da radiação incidente. O detector tem a função de identificar essa difração, realizar a contagem do número de fótons X difratados da amostra, e apresentar, desta forma, informações acerca da intensidade do feixe difratado. O detector depende, principalmente, do comprimento de onda da radiação de interesse e da intensidade máxima de fótons a ser medida.

As amostras de solo analisadas foram previamente moídas e homogeneizadas. Em seguida, foram coletadas alíquotas de aproximadamente 600 mg, as quais foram prensadas em um porta-amostra do tipo vazio utilizando-se o método de montagem denominado de *back loading*. A fonte de radiação utilizada foi monocromática $K\alpha 1$ do elemento cobalto (Co), $\lambda = 1,7889 \text{ \AA}$ a 40 kV e 30 mA, e o detector a gás do tipo proporcional a uma intensidade a ser medida em função do ângulo de varredura de 2θ , variando de 10 a 80 graus. Os dados gerados durante a leitura das amostras no difratômetro foram coletados, processados e armazenados pelo *software Data Collector* da *PANalytical*. A interpretação/caracterização foi realizada utilizando o programa

X'Pert High Score Plus. Esta análise também foi realizada no Laboratório de Raios X do Departamento de Física da UFC. O equipamento utilizado para realização das análises foi o difratômetro *X'Pert Pro* da marca *PANalytical*.

Na Figura 9 é apresentado o difratograma da amostra de solo analisada com a identificação de todos os minerais presentes. Observa-se de acordo com os resultados obtidos que os principais minerais identificados na amostra de solo foram o quartzo e a caulinita. A presença do quartzo foi identificada por picos bem definidos, estreitos, simétricos e intensos (intensidade até uma contagem de 17751), o que indica material com estrutura cristalina bem definida e presente em grande percentual (94%) na amostra. A caulinita foi identificada por meio de picos pouco intensos e largos, em pequena proporção (6%) na composição da amostra.

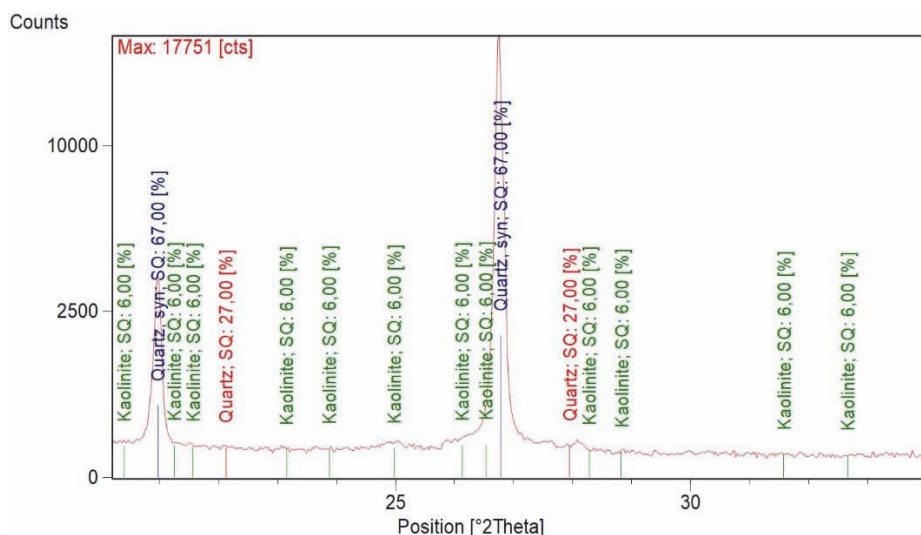


Fig. 9 – Difratograma da amostra de solo analisada.

3.4 – Emulsão Asfáltica

A emulsão asfáltica utilizada como agente da estabilização do solo é caracterizada como sendo do tipo catiônica de ruptura lenta (RL-1C). A utilização de uma emulsão do tipo de ruptura lenta se deu pela necessidade de compatibilizar o tempo de ruptura da emulsão com o tempo necessário para o envolvimento dos grãos do solo pelo ligante asfáltico durante a confecção das misturas solo-emulsão. A utilização de uma emulsão de cura rápida, ou média, podia levar a uma ruptura prematura da emulsão e não permitir o envolvimento dos grãos de solo de forma satisfatória. É importante mencionar, que este tipo de emulsão asfáltica foi o mesmo utilizado pelos diferentes autores citados anteriormente que desenvolveram estudos sobre as misturas solo-emulsão (Jacinto, 2005, 2010; Miceli Júnior, 2006; Gondim, 2008; Cavalcante *et al.*, 2009; Rebelo, 2009; Rebelo *et al.*, 2014; etc.). No Quadro 4 são apresentados os resultados dos ensaios de caracterização da emulsão asfáltica de acordo com a normalização brasileira.

Quadro 4 – Propriedades da emulsão asfáltica utilizada.

Ensaio Realizado	Especificações	Resultados
Viscosidade Saybolt Furol, s, a 50°C	(ABNT, 2000) Máx. 70	44
Peneiração, 0,84mm, % em peso máx.	(ABNT, 2012) 0,1	0,01
Resíduo, mín. % em peso	(ABNT, 1999) 60	63,2

3.5 – Procedimento de confecção das misturas solo-emulsão

As misturas solo-emulsão foram confeccionadas a partir da mistura manual da emulsão asfáltica à temperatura ambiente (25°C) e o solo previamente seco em estufa a 100°C. É importante destacar que a emulsão utilizada na confecção das misturas não foi diluída, nem o solo umedecido, conforme procedimentos-padrão utilizados por outros pesquisadores, conforme citado por Soliz (2007). No presente trabalho, optou-se pela não diluição da emulsão asfáltica pelo fato de a mesma já apresentar uma viscosidade suficiente baixa que permite o envolvimento dos grãos do solo durante a operação de mistura manual. Além disto, a não adição de água à sua composição evita que haja alteração de sua composição e uma eventual ruptura prematura, o que iria prejudicar o envolvimento satisfatório dos grãos minerais, e a uniformização do filme betuminoso formado. Em relação ao não umedecimento do solo, optou-se por não o fazer, apesar de estudos anteriores sugerirem tal procedimento, pelo fato de que sendo os ligantes asfálticos materiais hidrófobos, a presença da água na superfície dos grãos minerais poderia prejudicar a adesividade do asfalto residual às partículas de solo. A Figura 10 ilustra todos os procedimentos realizados durante a confecção das misturas solo-emulsão estudadas.



Fig. 10 – Procedimentos de confecção das misturas solo-emulsão.

O teor de emulsão inicial utilizado para a confecção das misturas foi definido a partir de um procedimento empírico e tátil-visual. Foi definido como o teor de emulsão inicial aquele que conferisse ao solo seco alguma coesão por meio do amassamento manual da mistura solo-emulsão estudada (Figura 11). A partir do teor inicial de emulsão definido conforme este procedimento, foram confeccionadas misturas solo-emulsão com 10 teores de emulsão, a partir do teor inicial

com aumentos gradativos de 2%, em peso. De acordo com este procedimento, os teores de emulsão, em relação à massa total, utilizados na confecção das misturas solo-emulsão foram: 13%, 15%, 17%, 19%, 21%, 23%, 25%, 27%, 29% e 31%.



Fig. 11 – Aspecto da mistura solo-emulsão após amassamento manual no teor de emulsão inicial.

3.6 – Compactação das misturas solo-emulsão

No presente trabalho foi avaliada a influência da metodologia de compactação das misturas solo-emulsão e da viscosidade do filme betuminoso formado sobre os grãos minerais nos parâmetros físicos massa específica aparente (DNER, 1994), percentagem do volume de vazios e percentagem do volume de vazios em relação ao grão mineral (Dantas Neto *et al.*, 2016; Lima, 2016). Desta forma, as misturas solo-emulsão confeccionadas de acordo com os procedimentos descritos anteriormente foram compactadas empregando-se a metodologia Proctor com as energias normal e modificada, e o método Marshall (DNER, 1995), tradicionalmente utilizado nos procedimentos de compactação em laboratório e dosagem de misturas asfálticas para aplicações em pavimentação.

Dantas Neto *et al.* (2016) estudaram a influência da viscosidade do ligante betuminoso nas propriedades físicas das misturas entre solo e elevados teores emulsão por meio da compactação das misturas imediatamente após a sua confecção, ou seja, antes da ruptura da emulsão asfáltica, e após 24 horas, tempo considerado como o necessário para que ocorresse a ruptura da emulsão asfáltica. Em ambos os casos, as misturas solo-emulsão, compactadas segundo a metodologia Proctor foram compactadas à temperatura ambiente (25°C). No presente trabalho, as misturas entre solo e emulsão foram compactadas segundo as metodologias descritas anteriormente à temperatura ambiente de 25°C, e imediatamente após permanecerem em estufa a 100°C durante um período de tempo de 24 horas. A colocação das misturas solo-emulsão em estufa a 100°C por 24 horas ocorreu após o envolvimento dos grãos de solo pela emulsão asfáltica ainda em estado líquido, e após a ruptura da emulsão, e teve por objetivos a diminuição da viscosidade do filme residual de betume que envolve os grãos minerais, uma vez que o asfalto é um material termoviscoelástico, e promover a evaporação da água e emulsificante ainda presentes após a ruptura da emulsão, visando com isto melhorar as características de adesividade grão-betume, e promover uma melhor compactação. O valor de 100°C para a temperatura de aquecimento foi adotada pela possibilidade de no campo haver o aquecimento da mistura sem grandes dispêndios no tocante à energia calorífica necessária, de forma a minimizar o custo de produção da mesma, e também pelas facilidades de aquecimento utilizando os equipamentos usuais existentes nos laboratórios (estufas).

No Quadro 5 são apresentados todos os procedimentos de compactação utilizados no presente trabalho para avaliação das misturas solo-emulsão estudadas.

Quadro 5 – Resumo dos procedimentos adotados para a compactação das misturas solo-emulsão.

Metodologia de compactação	Código	Condições de compactação	Temperatura de compactação
Marshall	M24	Após 24 horas da confecção da mistura	Temperatura ambiente (aproximadamente 25°)
Marshall	MQ	Após 24 horas da confecção da mistura	100°C
Proctor normal	PN24	Após 24 horas da confecção da mistura	Temperatura ambiente (aproximadamente 25°)
Proctor modificado	PM24	Após 24 horas da confecção da mistura	Temperatura ambiente (aproximadamente 25°)

3.7 – Microscopia da estrutura das misturas solo-emulsão compactadas

Ensaio de microscopia na estrutura compactada das misturas solo-emulsão foram realizados com o objetivo de se analisar a influência dos parâmetros avaliados na distribuição dos materiais na massa das misturas solo-emulsão estudadas. Para a visualização da estrutura compactada das misturas solo-emulsão foi utilizado o estereoscópio de pesquisa *SMZ18* da *Nikon*, com zoom manual, taxa de zoom de 18:1, e uma alcance do zoom de 0,75-13,5x. As imagens foram capturadas utilizando o sistema de câmeras digital (*Digital Sight DS-Ri1*) com resolução de 12,7 megapixels.

4 – RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1 – Influência da metodologia de compactação

A seguir são apresentados os resultados obtidos para os parâmetros físicos das misturas solo-emulsão compactadas de acordo com a metodologia Marshall (75 golpes/face), 24 horas após a mistura dos materiais, conforme procedimento descrito anteriormente. Os resultados obtidos para todos os parâmetros físicos das misturas compactadas (massa específica aparente, percentagem de volume de vazios e percentagem de vazios em relação ao grão mineral) são comparados àqueles apresentados por Dantas Neto *et al.* (2016) que compactaram misturas entre solo e emulsão com os mesmos materiais e nas mesmas condições utilizando a metodologia Proctor com as energias normal e modificada.

A Figura 12 apresenta a variação da massa específica aparente das misturas solo-emulsão compactadas 24 horas após a mistura dos materiais (solo e emulsão) utilizando a metodologia Marshall, e a comparação com os resultados de Dantas Neto *et al.* (2016). Estes resultados mostram que a compactação das misturas solo-emulsão utilizando a metodologia Marshall permitiu a definição de um valor máximo para a massa específica aparente, e um correspondente teor ótimo de ligante, assim como já havia ocorrido quando da compactação das misturas por Dantas Neto *et al.* (2016) na energia Proctor modificada. Isto mostra, que a energia de compactação aplicada pela metodologia Marshall foi também capaz de promover a compactação das misturas entre solo e emulsão por meio da deformação produzida no filme betuminoso que

envolve os grãos, o qual foi citado por Dantas Neto *et al.* (2016) como o mecanismo que controla a compactação das misturas solo-emulsão com elevados teores de emulsão.

De uma forma geral, observa-se que a metodologia Marshall produziu uma compactação mais eficiente nas misturas entre solo e emulsão que a metodologia Proctor na energia modificada, conforme pode-se observar nos maiores valores de massa específica aparente (Figura 12), e nas menores percentagens de vazios na mistura (Figura 13) e de vazios em relação ao esqueleto mineral (Figura 14). Os resultados obtidos para a percentagens de vazios na mistura (Figura 13) e em relação ao grão mineral (Figura 14) mostraram as mesmas tendências descritas pelos resultados de Dantas Neto *et al.* (2016), ou seja, diminuição da percentagem de volume de vazios (V_v) na mistura até o teor de emulsão ótimo (correspondente à massa específica aparente máxima), e aumento da percentagem de vazios em relação aos grãos minerais (VGM) para teores de emulsão superiores ao valor adotado como ótimo. A diminuição e posterior constância, ou leve crescimento, após o teor ótimo de emulsão observado para a percentagem do volume de vazios se dá pelo fato do aumento do teor de emulsão produzir um aumento da espessura do filme betuminoso envolvendo os grãos de solo, o qual acaba por ocupar o mesmo volume nos vazios. Por outro lado, no caso da percentagem de vazios em relação ao grão mineral, observa-se que ao se atingir a condição ótima de compactação, qualquer adição de emulsão asfáltica irá contribuir para o aumento da espessura do filme betuminoso residual, o qual devido à sua rigidez, tende a afastar os grãos minerais, aumentando assim, os vazios no esqueleto mineral.

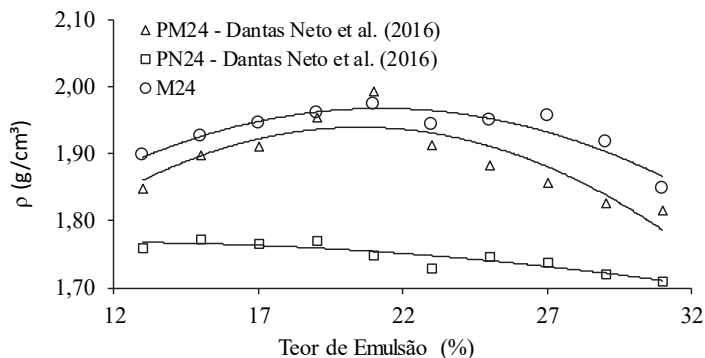


Fig. 12 – Influência da metodologia de compactação nos valores da massa específica aparente das misturas solo-emulsão.

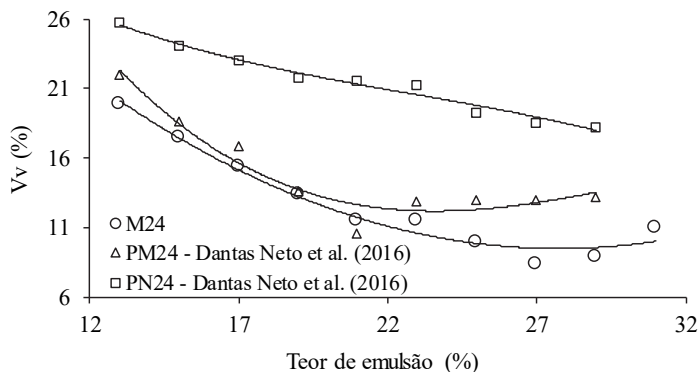


Fig. 13 – Influência da metodologia de compactação nos valores da percentagem do volume de vazios (V_v) das misturas solo-emulsão.

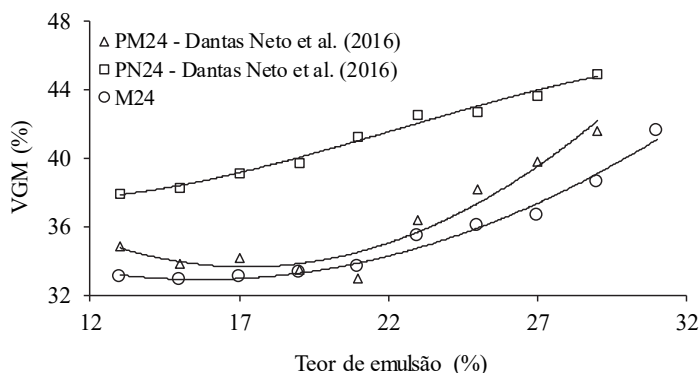


Fig. 14 – Influência da metodologia de compactação nos valores da percentagem de vazios em relação aos grãos minerais (VGM) das misturas solo-emulsão.

4.2 – Influência da temperatura do filme betuminoso na compactação das misturas solo-emulsão

Na Figura 15 são apresentadas as curvas de compactação das misturas M24 e MQ. Observa-se que o aumento da temperatura do filme betuminoso, promovido pelo aquecimento da mistura em estufa a 100°C antes da compactação levou a um aumento da massa específica aparente das misturas entre solo e emulsão, e a uma pequena diminuição das percentagens dos volumes de vazios da mistura (Figura 16) e dos vazios em relação aos grãos minerais (Figura 17). Isto comprova a hipótese que a rigidez do filme betuminoso dificulta a compactação das misturas solo-emulsão com elevados teores de emulsão asfáltica, pois, uma vez que a rigidez é diminuída pelo aumento da temperatura, as misturas atingiram uma condição mais compacta. Os resultados mostram ainda que apesar de o aumento da temperatura se refletir num ganho de eficiência na compactação, a condição ótima de compactação das misturas compactadas a 100°C é obtida aproximadamente com o mesmo teor de emulsão asfáltica da mistura compactada à temperatura ambiente.

Apesar de aparentemente o aquecimento das misturas entre solo e os elevados teores de emulsão se apresentar como um procedimento de laboratório, é importante se mencionar que no campo, caso necessário, tal procedimento pode ter também realizado, caso se haja necessidade de

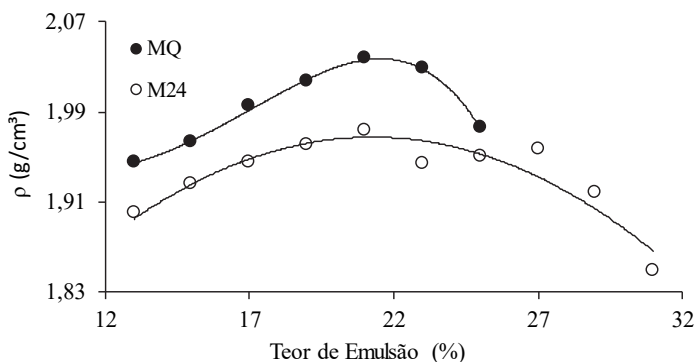


Fig. 15 – Variação da massa específica aparente com o teor de emulsão asfáltica das misturas M24 e MQ.

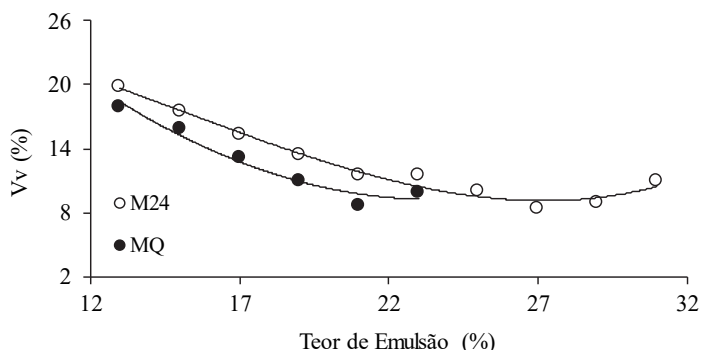


Fig. 16 – Variação da percentagem de volume de vazios com o teor de emulsão asfáltica das misturas M24 e MQ.

uma compactação mais eficiente. Neste caso, procedimentos tradicionais de usinagem de misturas asfálticas a quente poderiam ser utilizados, empregando-se menores energias que as usualmente utilizadas nas misturas usinadas a quente, o que não levaria a grandes aumentos de custos, e também a menores níveis de poluição.

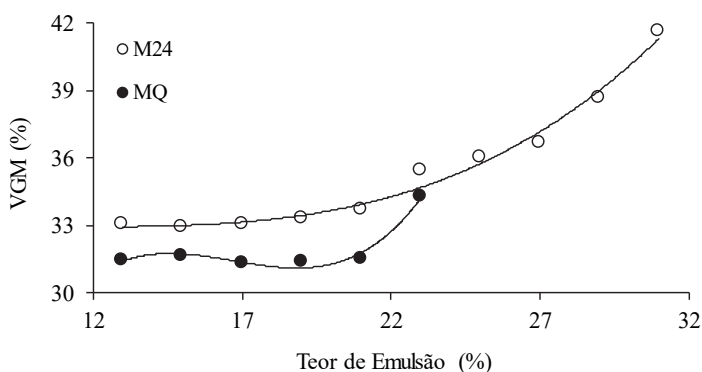


Fig. 17 – Variação da percentagem de volume de vazios em relação ao agregado mineral com o teor de emulsão asfáltica das misturas M24 e MQ.

4.3 – Microscopia da estrutura das misturas solo-emulsão

As Figuras 18 e 19 mostram as estruturas das misturas entre solo e emulsão asfáltica compactadas na metodologia Marshall à temperatura ambiente (M24) e a 100°C (MQ), confeccionadas com teores de 13% e 31%, respectivamente. Os resultados mostram que houve um melhor envolvimento dos grãos de solo pelo asfalto residual nas misturas compactadas após período em estufa a 100°C quando comparadas com as compactadas à temperatura ambiente de aproximadamente 25°C. Observa-se que a colocação das misturas em estufa a 100°C antes da compactação, além de promover a diminuição da viscosidade do ligante asfáltico, contribuindo para uma melhor compactação, promoveu uma melhor distribuição do asfalto residual no interior da massa de solo. Isto pode levar a um melhor comportamento das misturas solo-emulsão, uma vez que estando a mistura solo-emulsão mais homogênea, a possibilidade da formação de grumos, conforme reportado por Jacintho (2010), é menor, levando o material a um melhor desempenho em termos de comportamento mecânico e hidráulico.

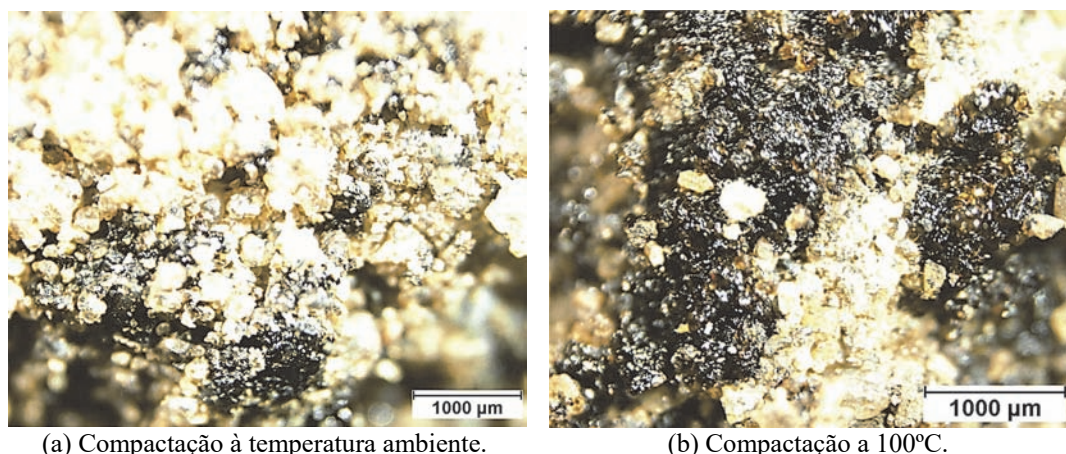


Fig. 18 – Estrutura das misturas solo-emulsão compactadas utilizando-se a metodologia Marshall com teor de emulsão igual a 13%.

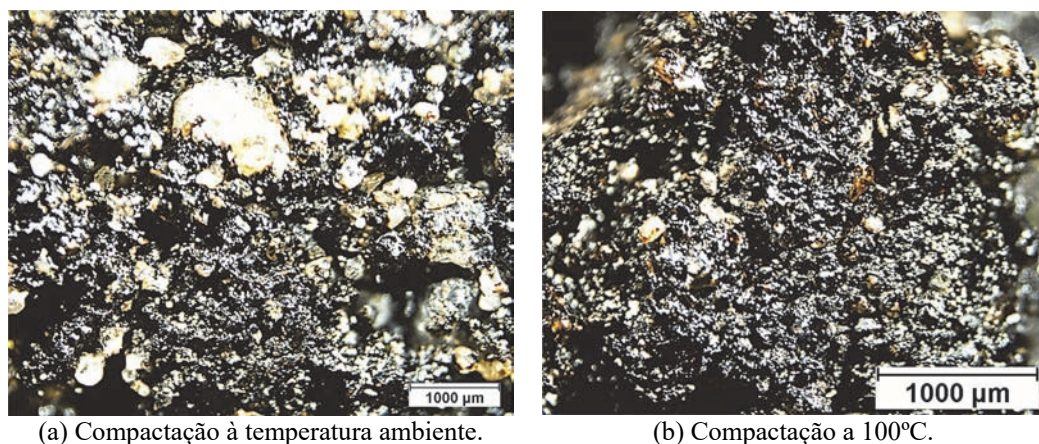


Fig. 19 – Estrutura das misturas solo-emulsão compactadas utilizando-se a metodologia Marshall com teor de emulsão igual a 31%.

5 – CONCLUSÕES

Os resultados de caracterização do solo utilizado na confecção das misturas solo-emulsão mostraram que se trata de uma areia siltosa, classificada segundo o SUCS como SM, constituída basicamente por elevadas proporções de quartzo e caulinita em menores proporções. Solos com tais características dificilmente apresentam propriedades de resistência ao cisalhamento, estanqueidade e deformabilidade quando compactados que sejam adequadas à execução de diferentes tipos de obras geotécnicas. Os resultados obtidos nos ensaios de caracterização química e mineralógica indicaram que este solo apresenta constituintes químicos que dificultam o processo de estabilização. Portanto, estudos adicionais além da definição da metodologia de compactação e dosagem das misturas solo-emulsão confeccionadas com este material granular são imprescindíveis, e serão realizados na continuidade do desenvolvimento deste trabalho.

No que se refere ao estudo da compactação das misturas solo-emulsão, observa-se que a utilização da metodologia Marshall produziu um aumento na massa específica aparente, e uma diminuição das percentagens de volume de vazios na mistura, e do volume de vazios em relação aos grãos minerais, se comparada com a metodologia Proctor com as energias normal e modificada. Além disto, outro fator importante mais uma vez na compactação das misturas solo-emulsão com elevados teores de emulsão asfáltica foi a rigidez, ou a viscosidade, do filme betuminoso residual que envolve os grãos de solo na mistura.

Conforme também observado por outros autores, a diminuição da viscosidade do filme betuminoso provocou uma melhoria as características de compactação das misturas solo-emulsão, expressas pelo aumento da massa específica aparente e redução das percentagens do volume de vazios, seja, da mistura, seja em relação aos grãos minerais. No presente trabalho, a viscosidade do filme betuminoso foi diminuída pelo aumento da temperatura da mistura solo-emulsão em estufa a 100°C. Os resultados da microscopia realizada nas misturas compactadas mostraram que o aquecimento do material previamente à compactação produziu uma melhor distribuição do ligante betuminoso na massa de solo, o que pode resultar no aumento da homogeneidade da mistura, e consequentemente, na melhoria do seu comportamento, em comparação às misturas compactadas a temperatura ambiente, nas quais ainda é possível observar a formação de alguns grumos formados entre o ligante betuminoso e a fração mais fina do solo.

Assim sendo, a partir dos resultados obtidos pode considerar-se que a utilização da metodologia Marshall possibilitou uma maior compactação das misturas entre solo e a emulsão asfáltica compactadas à temperatura ambiente 24 horas após a realização da mistura, quando comparada às compactações feitas nas mesmas condições pela metodologia Proctor (normal e modificada). Além disto, o procedimento de aquecimento à 100°C das misturas possibilitou uma melhor compactação das misturas estudadas (metodologia Marshall) pela diminuição da viscosidade do filme betuminoso.

6 – AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à empresa Asfalto Nordeste pelo fornecimento das amostras de emulsão asfáltica utilizadas, e à CAPES – Coordenação de Apoio à Pesquisa e Ensino Superior – pelo suporte financeiro dado durante a realização desta pesquisa.

7 – REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ABNT (1984a). NBR 6459 – *Solo – Determinação do Limite de Liquidez. Método de Ensaio*, Associação Brasileiro de Normas Técnicas, Rio de Janeiro, RJ, Brasil, 6 p.
- ABNT (1984b). NBR 7180 – *Solo – Determinação do Limite de Plasticidade. Método de Ensaio*, Associação Brasileiro de Normas Técnicas, Rio de Janeiro, RJ, Brasil, 3 p.
- ABNT (1984c). NBR 7181 – *Solo – Análise Granulométrica. Método de Ensaio*, Associação Brasileiro de Normas Técnicas, Rio de Janeiro, RJ, Brasil, 13 p.
- ABNT (1984d). NBR 6508 – *Solo – Grãos de Solo que Passam na Peneira de 4,8 mm – Determinação da Massa Específica. Método de Ensaio*, Associação Brasileiro de Normas Técnicas, Rio de Janeiro, RJ, Brasil, 8 p.
- ABNT (1986). NBR 6508 – *Solo – Ensaio de Compactação. Método de Ensaio*, Associação Brasileiro de Normas Técnicas, Rio de Janeiro, RJ, Brasil, 10p.
- ABNT (1999). NBR 14376 – *Emulsões Asfálticas – Determinação do Resíduo Asfáltico por Evaporação - Método Expedito. Método de Ensaio*, Associação Brasileiro de Normas Técnicas, Rio de Janeiro, RJ, Brasil, 3 p.

- ABNT (2000). NBR 14491 – *Emulsões Asfálticas – Determinação da Viscosidade Saybolt Furol. Método de Ensaio*, Associação Brasileiro de Normas Técnicas, Rio de Janeiro, RJ, Brasil, 3 p
- ABNT (2012). NBR 14393 – *Emulsões Asfálticas – Determinação da Peneiração. Método de Ensaio*, Associação Brasileiro de Normas Técnicas, Rio de Janeiro, RJ, Brasil, 3 p
- ANDA (1992), *Interpretação de Análise do solo – conceitos e aplicações*. Associação Nacional Para Difusão de Adubos. Boletim técnico nº2. 3ª edição, 1992.
- Cavalcante, E. H.; Santos, W. J.; Stumpf, T. R. A.; Veiga, I. L. (2009). *Uso de emulsão asfáltica na estabilização química de três solos de Sergipe*. IV Simpósio Internacional de Avaliação de Pavimentos e Projetos de Reforço. Fortaleza/ CE, Brasil, 8 p.
- Dantas Neto, S. A.; Lima, F. C.; Leme, R. F. (2016). *Estudo da Compactação de Misturas Solo-Emulsão Para Emprego em Núcleo de Barragem Zoneadas*. In: XVIII Congresso Brasileiro de Mecânica dos solos e Engenharia Geotécnica, 2016, Belo Horizonte, Minas Gerais, 8 p.
- DNER (1994). *DNER – ME 117 – Mistura betuminosa – determinação da densidade aparente diametral. Método de Ensaio*, Departamento Nacional de Estradas e Rodagem, Rio de Janeiro, RJ, Brasil, 4p.
- DNER (1995). *DNER – ME 043 – Misturas betuminosas a quente – ensaio Marshall. Método de Ensaio*, Departamento Nacional de Estradas e Rodagem, Rio de Janeiro, RJ, Brasil, 11p.
- EMBRAPA (1997). *Manual de Métodos de análise de solo*. Centro Nacional de Pesquisa do Solo, 2a edição, Rio de Janeiro, RJ, 212 p.
- Ferreira, A.M. (1980). *Estudo de três solos estabilizados com uma emulsão asfáltica catiônica*. Dissertação de Mestrado, Centro de Ciências e Tecnologia, Universidade Federal da Paraíba, Campina Grande, PB, 99 p.
- Gondim, L. M. (2008). *Estudo experimental de misturas solo-emulsão aplicado às rodovias do Agropólo do baixo Jaguaribe – Estado do Ceará*. Dissertação de Mestrado. Programa de Engenharia de Transporte, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, Ce, 219 p.
- Gouveia, L. T.; Fernandes Júnior, J. L.; Soares, J. B. (2007). Influência da energia de compactação no comportamento volumétrico e mecânico de misturas asfálticas. Transporte, volume XV, Nº 1, junho de 2007. ISSN: 1415-7713.
- Jacintho, E. C. (2005). *Estudo do comportamento de misturas solo-emulsão para uso em barragens*. Dissertação de Mestrado, Publicação Nº G.DM-132/05, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 160 p.
- Jacintho, E. C. (2010). *Estudo de propriedades e comportamentos de misturas solo-emulsão aplicado a barragens*. Tese de doutorado. Publicação G.TD-063/10, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, DF, 279 p.
- Lima, F. C. (2016). *Misturas solo-emulsão para emprego em núcleo de Barragens zonadas*. Dissertação de Mestrado. Departamento de Engenharia Hidráulica e Ambiental, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, Ce, 78 p.
- Linsha R. D.; Dharanya Y. P.; Vinodhini V.; Pavithra C. (2016). *Improvement of Shear Strength of Soil Using Bitumen Emulsion*. International Journal of Civil Engineering and Technology, 7(6), 2016, pp.156 – 165.
- Miceli Júnior, G. (2006). *Comportamento de solos do estado do Rio de Janeiro estabilizados com emulsão asfáltica*. Dissertação de Mestrado. Instituto Militar de Engenharia, Rio de Janeiro, RJ, 267 p.

- Nascimento, M. V.; Lucena, A. E. F. L.; Lucena, L. C. F. L.; Costa, S. C. F. E. (2003). *Comportamento mecânico de misturas asfálticas recicladas com uso de compactação por impacto e por amassamento*. *Ciência & Engenharia*, v. 22, n° 2, p. 115-120, jul – dez 2013.
- Pacheco, L. M. (2011). *Solos estabilizados com emulsão asfáltica para uso em pavimentação: estudo laboratorial*. Trabalho de Diplomação. Departamento de Engenharia Civil da Escola de Engenharia da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, RS, 93 p.
- Pessoa, F. H. C. (2004). *Análise dos solos de Urucu para fins de uso rodoviário*. Dissertação de Mestrado, Publicação N° G.DM-117A/04, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 151 p.
- Rebello, E. P. (2009). *Estudo de misturas solo-emulsão para a região de Urucu (Coari-AM)*. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal do Amazonas, Manaus, AM, 116 p.
- Rebello, E. P.; Ferreira, M. R. P.; Frota, C. A. (2014). *Comportamento da misturas solo-emulsão para o sistema viário de Urucu (Coari-AM)*. *ENGEVISTA*, V.16, n. 2. P. 180-190, junho 2014.
- Sampaio, M. G. (2008). *Comportamento mecânico e hídrico de solos estabilizados com emulsão asfáltica*. Dissertação de Mestrado. Universidade Estadual de Campinas, Faculdade de Engenharia Civil e Arquitetura, Campinas, SP, 157 p.
- Sant'ana, W. C. (2009). *Contribuição ao estudo de solo-emulsão em pavimentos de rodovias de baixo volume de tráfego para o estado do Maranhão*. Tese de Doutorado, Universidade de São Paulo, SP, 341 p.
- Silva, A. L. (2013). *Caracterização mineralógica por difração de raios x e determinação de terras raras por ICP-MS de rochas da região sul da Bahia*. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal de Minas Gerais, Escola de Engenharia, Belo Horizonte, MG, 114 p.
- Soliz, V. V. P. (2007). *Estudo de três solos estabilizados com emulsão asfáltica*. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, RJ, 166 p.
- Suarez, D. A. A. (2008). *Estudo do comportamento mecânico de dois solos lateríticos do estado de São Paulo com adição de emulsão asfáltica*. Dissertação de Mestrado. Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, SP, 144 p.
- Thuller, R.B. (2005). *Estudo de solos do Estado do Rio de Janeiro para aplicação em baixo volume de tráfego*. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil), COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, RJ, 2005, 120 p.
- Verma, S.K.(2015). *A Laboratory Study On Use Of Bitumen Emulsion In Black Soil*. *International Research Journal of Engineering and Technology (IRJET)* Vol. 02, 2015, pp 548- 553



- > **Prospecção Geotécnica**
Site Investigation
- > **Consultoria Geotécnica**
Geotechnical Consultancy
- > **Obras Geotécnicas**
Ground Treatment-Construction Services
- > **Controlo e Observação**
Field Instrumentation Services and Monitoring Services
- > **Laboratório de Mecânica de Solos**
Soil and Rock Mechanics Laboratory

Certificada ISO 9001 por



Geocontrole



Parque Oriente, Bloco 4, EN10
2699-501 Bobadela LRS
Tel. 21 995 80 00
Fax. 21 995 80 01
e.mail: mail@geocontrole.pt
www.geocontrole.pt


Geocontrole
Geotecnia e Estruturas de Fundação SA

**Much more support
to your business.**



Incotep - Anchoring Systems

Incotep anchoring Systems is a division of Açotubo Group, which engaged in the development of Anchoring Systems, used in geotechnical and structural applications where high quality prestressing systems are designed to meet diverse needs.

Know our solutions for your processes

- Self Drilling Injection Hollow Bar
- Cold Rolled Thread Bars and Micropiles
- Hot Rolled Thread Bars
- Incotep Tie Rods (Port and Dike Construction)

- Umbrella Tubes Drilling System
- Pipes for Root Piles, among others

www.incotep.com.br
+55 11 2413-2000

Incotep
Sistemas de Ancoragem



A company Açotubo Group



Geotécnica e Reabilitação

TEIXEIRA DUARTE

ENGENHARIA E CONSTRUÇÕES, S.A.

• Sede

Lagoas Park – Edifício 2
2740-265 Porto Salvo - Portugal
Tel.: (+351) 217 912 300
Fax: (+351) 217 941 120/21/26

• Angola

Alameda Manuel Van Dunen 316/320 - A
Caixa Postal 2857 - Luanda
Tel.: (+34) 915 550 903
Fax: (+34) 915 972 834

• Argélia

Parc Miremont – Rua A, N°136 - Bouzareah
16000 Alger
Tel.: (+213) 219 362 83
Fax: (+213) 219 365 66

• Brasil

Rua Iguatemi, nº488 – 14º - Conj. 1401
CEP 01451 - 010 - Itaim Bibi - São Paulo
Tel.: (+55) 112 144 5700
Fax: (+55) 112 144 5704

• Espanha

Avenida Alberto Alcocer, nº24 – 7º C
28036 Madrid
Tel.: (+34) 915 550 903
Fax: (+34) 915 972 834

• Moçambique

Avenida Julius Nyerere, 130 – R/C
Maputo
Tel.: (+258) 214 914 01
Fax: (+258) 214 914 00

www.teixeiraduarte.pt

1. TECCO® SYSTEM³ teste em escala real, Suíça, outubro 2012
2. TECCO® SYSTEM³ instalação, B462, Alemanha
3. Ângulo máximo de inclinação de 85° durante o teste de campo



TECCO® SYSTEM³ – Seu talude estabilizado

... validado por teste em escala real com inclinação do talude de até 85°.

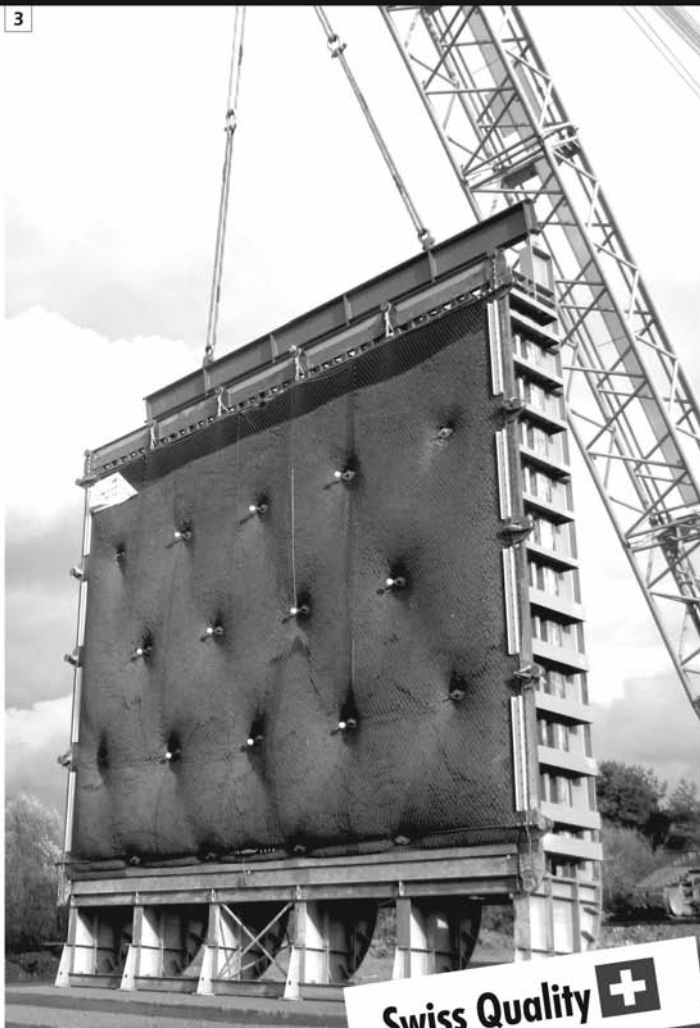
A malha de aço de alta resistência TECCO®, as placas de ancoragem e garras de conexão TECCO®, juntas, estabilizaram com sucesso 230 toneladas de cascalho com 85° de inclinação em um ensaio em escala real.

- moldura de teste com dimensões 10 x 12 x 1.2m
- espaçamento dos grapmas 2.5m x 2.5m, utilizando Gewi 28mm

Para um estudo preliminar de solução de estabilização ou de riscos de desastres naturais nas obras em que você atua, entre em contato conosco através do e-mail info@geobrugg.com



Assista ou escaneie nosso filme com instalação TECCO® em www.geobrugg.com/slopes



Geobrugg AG, Geohazard Solutions
 Rua Visconde de Pirajá, 82 sl.606
 Ipanema - Rio de Janeiro • 22410-003
 Fone: +55 21 3624.1449
 Cel: +55 21 99979.1288
www.geobrugg.com

Swiss Quality 

SOLOS MOLES?



CPR[®]

CONSOLIDAÇÃO PROFUNDA RADIAL

**O MAIS RÁPIDO E EFETIVO
TRATAMENTO PARA SOLOS MOLES**

Processo de adensamento de solo mole, eficientemente controlado, monitorando-se o grau de consolidação desejado.



Vantagens do CPR

- 100% específico para solos moles;
- Mobilização rápida;
- Ausência de transtornos à obra;
- Ampla gama de aplicações;
- Ausência de aterros, refugos e lama;
- Técnica não destrutiva;
- Alternativa super econômica, além de prazos extremamente curtos em relação à substituição de solos, aterros temporários, colunas granulares e estaqueamentos;
- Alcança profundidades de tratamento onde técnicas clássicas são limitadas;
- Acesso a locais restritos, limitados e difíceis, sem interferência com a rotina do cliente;
- Melhor custo benefício;
- Perfeito para reforço de fundação.

www.engegraut.com.br

Para maiores informações, entre em contato com nosso departamento de geotecnia. A marca CPR[®] e a tecnologia Consolidação Profunda Radial são patentes da ENGEGRAUT.

SPECIALISTS IN GEOTECHNICAL IN-SITU TESTS AND INSTRUMENTATION

GEOTECHNICAL SERVICES (onshore and offshore)

IN-SITU TESTS

- Seismic CPT
- Cone Penetration Testing Undrained-CPTu (cordless system)
- Vane Shear Testing (electrical apparatus)
- Pressuremeter Testing (Menard)
- Flat Dilatometer Test-DMT (Machetti)
- Standard Penetration Test-SPT-T

INSTRUMENTATION

- Instrumentation, installation and direct import
- Routine Monitoring
- Operation and Maintenance
- Engineering analyses
- Consultancy, design & geotechnical engineering services

SAMPLING

- Soil sampling and monitoring
- Groundwater sampling and monitoring
- Field and laboratory testing

ENVIRONMENTAL

- Environmental Services
- Soil and groundwater sampling and monitoring
- Field and laboratory testing

0800 979 3436

São Paulo: +55 11 8133 6030

Minas Gerais: +55 31 8563 2520 / 8619 6469

www.deltageo.com.br deltageo@deltageo.com.br



geofix

A maior carteira de
clientes privados do
Brasil, e o maior índice
de repetição absoluta.

Dentre os tipos de serviços, destacam-se projetos
de controle ambiental tais como: recuperação de
solos degradados; confinamento de lençol
freático contaminado; construção de filtros e
captação de material; contenção de poluentes.

**Pionismo que se traduz em confiança
e qualidade para sua obra.**



www.geofix.com.br



Technologie
que abraça o Brasil

15

Deutsche Technologie e um toque brasileiro.

Fundada há mais de 150 anos na Alemanha, a Huesker é hoje uma referência mundial em geossintéticos. Aqui no Brasil, adicionamos um toque bem brasileiro a toda a qualidade e tecnologia dos nossos produtos.

Proximidade, envolvimento e flexibilidade são os fatores que, nestes 15 anos, nos permitiram desenvolver soluções sob medida para cada caso e manter relações duradouras com nossos clientes.

Isso é a **tecnologia alemã** e o **abraço brasileiro** a seu serviço.

Fale com a Huesker:
www.huesker.com.br
huesker@huesker.com.br
(12) 3903 9300



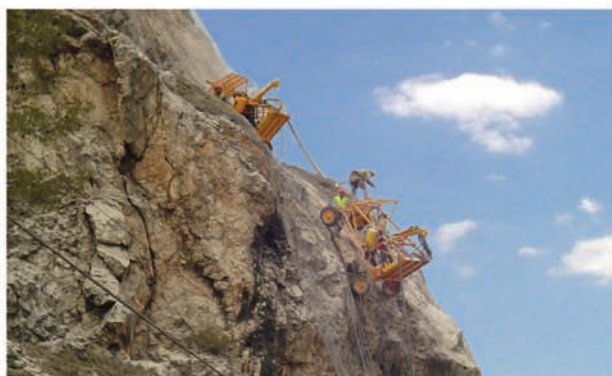
HUESKER
Tecnologia alemã, *Deutsche Technologie,*
abraço brasileiro. *brasilianische Umarmung.*

CONSULTORES DE ENGENHARIA E AMBIENTE



GEOLOGIA E GEOTECNIA

Hidrogeologia • Geologia de Engenharia • Mecânica das Rochas • Mecânica de Solos
Fundações e Estruturas de Suporte • Obras Subterrâneas • Obras de Aterro
Estabilidade de Taludes • Geotecnia Ambiental • Cartografia Geotécnica



- Planeamento de Recursos Hídricos
- Aproveitamentos Hidráulicos
- Produção e Transporte de Energia Eléctrica
- Sistemas de Abastecimento de Água e de Águas Residuais e Pluviais
- Agricultura e Desenvolvimento Rural
- Infra-estruturas Rodoviárias, Ferroviárias e Aeroportuárias
- Ambiente
- Estruturas Geotécnicas
- Cartografia e Cadastro
- Controle de Segurança e Reabilitação de Obras
- Gestão e Fiscalização de Empreendimentos



PORTUGAL

REGIAO CENTRO E SUL
Av. 5 de Outubro, 323
1649-011 LISBOA
Tel.: (351) 210 125 000, (351) 217 925 000
Fax: (351) 217 970 348
E-mail: coba@coba.pt
www.coba.pt

Av. Marquês de Tomar, 9, 6.
1050-152 LISBOA
Tel.: (351) 217 925 000
Fax: (351) 213 537 492

REGIÃO NORTE

Rua Mouzinho de Albuquerque, 744, 1.
4450-203 MATOSINHOS
Tel.: (351) 229 380 421
Fax: (351) 229 373 648
E-mail: engico@engico.pt

ANGOLA

Praceta Farinha Leitão, edifício nº 27, 27-A - 2.^o Dto
Bairro do Maculusso, LUANDA
Tel./Fax: (244) 222 338 513
E-mail: geral.coba-angola@netcabo.co.ao

MOÇAMBIQUE

Centro de Escritórios. Pestana Rovuma Hotel.
Rua do Se nº114, 4.^o Andar - 401 A, MAPUTO
Tel.: (258) 21 328 813
Fax: (258) 21 016 165
Tlm: (258) 820 047 454
E-mail: coba.mz@gmail.com

ARGÉLIA

09 Rue des Frères Hocine
El Biar - 16606, ARGEL
Tel.: (213) 21 922 802
Fax: (213) 21 922 802
E-mail: coba.alger@coba.pt

BRASIL

Rio de Janeiro
Rua Buenos Aires 68, 2.^o
Centro, Rio de Janeiro, RJ - CEP 20.070-022
Tel.: (55 21) 3553 67 30
Fax: (55 21) 8366 00 06
E-mail: geral@coba.com.br

Fortaleza

Av. Senador Virgílio Távora 1701, Sala 403
Aldeota - Fortaleza CEP 60170 - 251
Tel.: (55 85) 3244 32 85
Fax: (55 85) 3244 32 85
E-mail: coba1@eisenhower.com.br

EMIRATOS ÁRABES UNIDOS

LIJ Business Center, Al Jazeera Stadium
PO Box 38360, Abu Dhabi - U.A.E.
Tel.: (971) 2 495 0675
Fax: (971) 2 4454672

Whatever your geotechnical challenge

Reinforced soil slopes with
Green Terramesh®

Dynamic Rockfall barriers

we can engineer a better solution

Rock slope protection with SteelGrid®

Reinforced Soil Walls with
Terramesh® System

Engineering a better solution



Follow us:

[/maccaferri](#) [/maccaferriuk](#) [@Maccaferri_BB](#) [/MaccaferriWorld](#) [/maccaferriworld](#)

For technical data, software and more, visit:
www.maccaferri.com/br

MACCAFERRI

CONSTRUINDO UM MUNDO MELHOR



Consultoria em Engenharia e Arquitetura

Geologia, Geotecnia, Fiscalização de Obras Geotécnicas

Barragens de Aterro, Obras Subterrâneas, Estruturas de Suporte

Fundações Especiais, Tratamento de Terrenos, Geomateriais



MEMBER OF



www.tpfplanegecenor.pt



PROVA DE CARGA ESTÁTICA

Célula Expansiva Hidrodinâmica®

DISPENSA SISTEMA DE REAÇÃO

- Ideal para qualquer capacidade de carga.
- Economia, segurança e rapidez na execução.
- Indicado para todos os tipos de fundação.
- Pioneira mundial em prova de carga estática bidirecional.

“Há 44 anos desenvolvendo nossas tecnologias, soluções inteligentes e criativas dentro da engenharia de solos.”

REFORÇO DE FUNDAÇÕES MICROESTACA ARCOS®:

- Ideal para reforço de fundações e cravação de estacas em locais de difícil acesso.
- Economia, segurança e rapidez na execução.



Desde 1969

+55 31 3274.0155 | www.arcos.eng.br
Belo Horizonte - MG - Brasil

ARCOS 44
engenharia de solos anos

APRESENTAÇÃO DE ORIGINAIS

Os trabalhos a publicar na revista Geotecnia são classificados como "Artigos", "Notas Técnicas" e "Discussões" de artigos anteriormente publicados na revista. Artigos que descrevam o estudo de casos de obra envolvendo trabalho original relevante na prática da engenharia civil são particularmente encorajados.

A decisão de publicar um trabalho na revista compete à Comissão Editorial, competindo-lhe também a respetiva classificação. Cada trabalho será analisado por pelo menos três revisores. Os pareceres dos revisores serão apresentados no prazo de um mês.

As Instruções para os Autores e o "Template" para formatação de originais podem ser obtidos de <http://www.spgeotecnia.pt>.

A submissão dos trabalhos à revista Geotecnia é efetuada através da página eletrónica com o endereço <http://www.revistageotecnia.com/>. Através dessa plataforma, far-se-á a comunicação entre a direção da revista, o corpo editorial e os autores para a revisão dos trabalhos. Outras informações e esclarecimentos adicionais podem ser pedidos a:

Direção da Revista Geotecnia
SPG, a/c LNEC
Av. Brasil, 101
1700-066 Lisboa
Portugal
E-mail: editor@revistageotecnia.com

PRESENTACIÓN DE ORIGINALES

Los trabajos para publicar en la revista Geotecnia se clasifican en "Artículos", "Notas Técnicas" y "Discusiones" de artículos anteriormente publicados en la revista. Se recomiendan especialmente artículos que describan el estudio de casos de obra que incorporen trabajos originales relevantes en la práctica de la ingeniería civil.

La decisión de publicar un trabajo en la revista compete a la Comisión Editorial, correspondiéndole también la respectiva clasificación. Cada trabajo será analizado por al menos tres revisores. Los revisores presentarán sus pareceres sobre los artículos en el plazo de un mes.

Las Instrucciones para los Autores y el "Template" para formatear originales pueden ser obtenidos en <http://www.spgeotecnia.pt>.

La remisión de los trabajos a la revista Geotecnia se efectúa a través de la página electrónica con la dirección <http://www.revistageotecnia.com/>. A través de esta plataforma se realizará la comunicación entre la dirección de la revista, el cuerpo editorial y los autores para la revisión de los trabajos. Informaciones y esclarecimientos adicionales pueden solicitarse a:

Dirección de la Revista Geotecnia
SPG, a/c LNEC
Av. Brasil, 101
1700-066 Lisboa
Portugal
E-mail: editor@revistageotecnia.com

- 3 **Abordagem data mining para a previsão da resistência à compressão uniaxial de misturas laboratoriais de solo-cimento**
Data mining approach for unconfined compression strength prediction of laboratory soil cement mixtures
Joaquim Tinoco, António Alberto S. Correia, Paulo J. Venda Oliveira, A. Gomes Correia, Luís J. L. Lemos
- 17 **Métodos hiperbólico y Asaoka, otros usos. Caso del equilibrio de la humedad de suelos no saturados. Teoría**
Hyperbolic and Asaoka's methods, other uses. Case of water content equilibrium of unsaturated soils. Theory.
Miriam Martín Ruiz, Enrique Asanza Izquierdo
- 29 **Interveniência de reforço em lastro ferroviário sob carga de alto tráfego**
Intervienience of reinforcement in railway ballast with load of high traffic
Luiz Gustavo Paulo Oran, Delma de Mattos Vidal, José Amaro de Souza Romero, Kledermon Garcia, Elizeu do Nascimento Filho
- 43 **Comportamento térmico do solo: estudo experimental pelo Hot Wire Method e aplicação numérica**
Soil thermal behaviour: Characterization by the Hot Wire Method and numerical application
Henrique Lopes, Ana Vieira, Sofia Soares
- 61 **Estudo dos mecanismos de compactação em misturas entre solo arenoso e altos teores de emulsão asfáltica**
Study of the compaction mechanism in mixtures of sandy soil and high asphalt emulsion contents
Fabiola Costa de Lima, Silvrano Adonias Dantas Neto