

INFLUÊNCIA DA GEOMETRIA DAS LIGAÇÕES NO COMPORTAMENTO HIDRO-MECÂNICO DE AREIAS TRATADAS COM CIMENTO

Influence of bond geometry on the hydro-mechanical behaviour of sands treated with cement

Rafaela Cardoso^a

^a Departamento de Engenharia Civil, Arquitectura e Georrecursos, Instituto Superior Técnico, Universidade de Lisboa. CERIS

RESUMO – Da mistura de solos com ligantes hidráulicos resultam materiais cimentados artificialmente através de ligações físicas (minerais resultantes da hidratação do ligante). A geometria das ligações é controlada pela quantidade de água usada no processo construtivo que, por sua vez, depende de requisitos de trabalhabilidade e da adição ou não de adjuvantes. Na compactação a quantidade de água é baixa e as ligações tendem a concentrar-se nos contactos entre as partículas, onde a água fica retida num solo não saturado. Na injeção a quantidade de água é alta (assim como a dosagem) e as ligações são dispersas. Discute-se de que forma a geometria das ligações resultante do processo de mistura afecta o comportamento hidro-mecânico de solos arenosos tratados com cimento Portland. Usa-se como exemplo os resultados de ensaios realizados em amostras de uma areia tratada com diferentes dosagens de cimento e relações água/cimento, que permitiram a caracterização do seu comportamento mecânico e hidráulico, e ainda ensaios não destrutivos para caracterização dessas ligações. Observa-se porosidade dupla quando as ligações são concentradas, o que afecta essencialmente as características hidráulicas. As características mecânicas dependem essencialmente da dosagem de cimento, mas a quantidade de água usada também afecta as características da pasta de cimento endurecida.

SYNOPSIS – Artificially cemented soils result from mixing soils with hydraulic binders, in which particles are joined together through physical bonds (minerals from the hydration of the binder). The geometry of the connections is controlled by the amount of water used in the preparation which, in turn, depends on workability requirements and the addition or not of adjuvants. In compaction the amount of water is low and the bonds tend to concentrate on the contacts between the particles, where water concentrates in unsaturated soils. In the injection the quantity of water is high (as well as the dosage), and the connections are dispersed. The form how the geometry of the connections due to the water used at preparation affects the hydro-mechanical behaviour of sandy soils treated with Portland cement is discussed. The results of tests carried out on samples of sand treated with different dosages of cement and water/cement ratios, which allowed the characterization of its mechanical and hydraulic behaviour, as well as non-destructive tests to characterize these connections, are used as example. Double porosity is observed when the connections are concentrated, which affects mainly the hydraulic behaviour. The mechanical parameters are sensitive to cement dosage, however the amount of water also impacts this behaviour because it affects the hardened cement paste.

Palavras Chave – ligações, solo-cimento, areia, microestrutura.

Keywords – bond, soil-cement, sand, microstructure.

E-mail: rafaela.cardoso@tecnico.ulisboa.pt

ORCID: orcid.org/0000-0002-4551-3868

1 – INTRODUÇÃO

A mistura de solos com ligantes, geralmente hidráulicos, é uma técnica de melhoramento de terrenos muito comum e usada em múltiplas aplicações geotécnicas, como por exemplo em camadas de base e sub-base de pavimentos (Davies e Fendukly, 1994; Consoli *et al.* 2010; El Euch *et al.* 2010), na construção de aterros, para melhoramento de solos de fundação, na execução de barreiras e na execução de contenções (Porbaha *et al.* 2000; Fang *et al.* 2001).

Estes solos são cimentados artificialmente pois o material resultante desta mistura, após endurecer, possui coesão verdadeira porque as partículas ficam unidas entre si através de ligações físicas formadas pelos minerais resultantes da hidratação do ligante. De forma genérica, a presença destas ligações aumenta a resistência e a rigidez do material, reduzindo a sua ductilidade. Do ponto de vista do comportamento hidráulico, a permeabilidade diminui porque há colmatação dos vazios (efeito mais importante para os solos grossos, tais como as areias), e a expansibilidade dos solos finos diminui porque as ligações restringem as variações de volume dos minerais argilosos na molhagem. Estes efeitos é que são geralmente considerados para justificar que um dado tratamento é eficiente ou não, e para explicar as melhorias conseguidas.

A geometria das ligações é controlada pela quantidade de água usada no processo construtivo que, por sua vez, depende de requisitos de trabalhabilidade e da adição ou não de adjuvantes. As diferentes geometrias têm consequências diferentes no comportamento hidro-mecânico do material. Há algumas diferenças entre compactação de misturas de solo cimento e injeção de calda de cimento para promover a sua mistura com o solo, chamando-se a atenção para as seguintes:

- No caso da compactação, a mistura e sua composição são perfeitamente controladas. A resistência é associada ao ponto ótimo porque a mistura é tratada como um solo com curva de compactação Proctor. Tal é válido mesmo que se trate de um solo arenoso, porque o cimento adicionado é como se se tratasse de fracção fina. Neste caso, a água é necessária para promover a hidratação completa dos minerais do ligante, e eventualmente reacções químicas entre as partículas de solo e o ligante. O teor em água ótimo depende do tipo de solo e da quantidade de ligante adicionado.

- No caso de injeção, a mistura e sua composição são mais difíceis de controlar e a homogeneidade da mistura não é garantida na totalidade do volume tratado. A resistência conseguida está associada não só à dosagem de ligante, mas também à sua homogeneidade em volume.

Existem muitos estudos em que as ligações são consideradas explicitamente na modelação do comportamento destes materiais (Gajo *et al.* 2015; Cardoso *et al.* 2017), mas não se estudam as ligações em si, apenas os efeitos da sua presença. Por exemplo, adoptando parâmetros de dano que permitem considerar a rotura de ligações devida a carregamento mecânico ou considerações (Gens e Nova, 1993; Ribeiro *et al.* 2016). Consoli e co-autores (Consoli *et al.* 2010, 2011, por exemplo) foram os primeiros a considerar a presença das ligações através do volume de vazios ocupado pela pasta endurecida, mas o intervalo de água e de dosagem de cimento está limitado a uma dada geometria de ligações, e o tratamento dos resultados é essencialmente matemático. Neste artigo é discutida de que forma a geometria das ligações afecta o comportamento hidro-mecânico de solos arenosos tratados com cimento Portland, com base nos resultados de trabalhos publicados antes e que agora foram enquadrados num contexto geotécnico diferente. Usa-se como exemplo os resultados de ensaios realizados em amostras de uma areia tratada com diferentes dosagens de cimento e relações água/cimento, que permitiram a caracterização do seu comportamento mecânico e hidráulico, e ainda ensaios não destrutivos para caracterização dessas ligações.

Na preparação das amostras fixou-se o peso volúmico seco da areia para se poder comparar apenas os efeitos das ligações no comportamento hidro-mecânico. A principal novidade deste estudo em relação aos já existentes reside no facto de se realizar uma análise micromecânica, ou seja, considerar a geometria das ligações em vez da dosagem de cimento para explicar o

comportamento observado. Tal só é possível porque, pelo que se saiba, pela primeira vez é que se considerou a quantidade de água usada na preparação, combinada com a quantidade de cimento também variável num intervalo relativamente extenso, realista para aplicações geotécnicas correntes.

2 – PREPARAÇÃO DAS AMOSTRAS

As amostras foram preparadas com areia que se classifica como SM - areia siltosa segundo a classificação unificada de solos. Tem 15% de finos não plásticos e o restante 85% de material tem partículas com diâmetro entre 0,074 mm e 4,76 mm. O peso volúmico das partículas é 26,3 kN/m³.

Foi usado cimento Portland de classe I (peso volúmico das partículas 31,0 kN/m³) e água da torneira. Estudaram-se as dosagens de 150, 200, 250 e 350 kg/m³, que correspondem a 10%, 13%, 17% e 23% em peso de cimento em relação ao peso de areia seca (teor em cimento). As percentagens mais baixas são ligeiramente superiores às adoptadas em solos compactados em camadas de pavimentos, enquanto que as mais altas são encontradas em colunas de jet grouting executadas em solos arenosos, apesar de nestas colunas as dosagens dependerem da distância ao injector. As misturas de cada dosagem foram preparadas fazendo variar a relação água cimento (w/c) para os valores 0,6, 1,2 e 1,8. O valor mais baixo representa valores próximos dos adoptados em misturas compactadas, enquanto que os valores mais altos representam misturas resultantes de injeção. Ainda que mais usuais em pavimentos, não se testaram dosagens inferiores a 10% para facilitar a montagem das amostras. No entanto, a mistura com a dosagem de 10% preparada com pouca água permite obter resultados contrastantes em relação aos obtidos quando se usam maiores quantidades de água para a mesma dosagem, ou a mesma quantidade de água para dosagens superiores. Considera-se assim este caso como um indicador do que acontece quando as menores dosagens de cimento e de água são usadas, podendo sendo encarado como o caso limite desse comportamento.

A preparação dos provetes procurou manter sempre a mesma quantidade de areia (fixou-se o peso volúmico seco só de areia em 15 kN/m³), fazendo variar a quantidade de cimento. Deste modo, apesar dos desvios que ocorrem naturalmente na preparação, pode-se atribuir as diferenças de peso volúmico essencialmente à ocupação dos vazios entre as partículas de areia pela pasta de cimento endurecida. Tem-se assim provetes com estruturas controladas maioritariamente pela presença das ligações cimentícias que, por sua vez, têm geometria controlada pela quantidade de água usada na mistura.

As misturas foram fabricadas com uma misturadora mecânica. Depois da mistura, no caso de $w/c=0,6$, o material foi compactado em moldes de modo a ter o peso volúmico seco definido para cada dosagem. Para os maiores valores de w/c , a mistura ficou fluida e foi vertida no molde até o preencher na totalidade. Houve o cuidado de remover as bolhas de ar através de vibração ligeira e o controlo da quantidade vertida. As diferenças na trabalhabilidade das misturas devidas à quantidade de água adicionada são visíveis na Figura 1 para a dosagem 350 kg/m³.

Prepararam-se provetes cilíndricos com 7 cm de diâmetro e 14 cm de altura. O peso volúmico seco, teor em água, w , índice de vazios, e , e porosidade, n , para os 28 dias de idade apresentam-se no Quadro 1 para os vários provetes. De uma maneira geral, a porosidade mantém-se fixando a dosagem de cimento, o que indica que existe o mesmo volume de vazios, apesar de as dimensões dos poros serem diferentes consoante a quantidade de água usada na mistura. Confirma-se também que o teor em água aumenta com w/c .

A cura foi feita por submersão logo após a preparação, com descofragem aos 3 dias de idade. Os ensaios de compressão simples e compressão diametral foram realizados para 3, 7, 14 e 28 dias de idade. No total, foram preparados 16 provetes de cada tipo: 12 provetes para ensaios de compressão simples (3 para cada tempo de cura), 3 provetes para cortar em 4 discos de igual espessura para a realização de ensaios de compressão diametral (1 provete para cada tempo de cura) e 1 provete para medição do coeficiente de permeabilidade saturado para 28 dias de cura. Os

fragmentos dos provetes com 28 dias de cura resultantes dos ensaios de compressão simples foram usados para a determinação da curva de retenção e extração de amostras para ensaios não destrutivos tais como porosimetrias por intrusão de mercúrio e observação em microscópio de varrimento de electrões.



Fig. 1 – Diferenças entre as misturas quando preparadas com caldas com diferentes relações w/c , para a dosagem de 350 kg/m^3 : a) $w/c=0,6$; b) $w/c=1,2$.

Quadro 1 – Características dos provetes após 28 dias de cura (valores médios de 3 amostras).

Dosagem (kg/m^3)	w/c	Peso volúmico seco (kN/m^3)	w (%)	e	n (%)
150	0,6	$17,01 \pm 0,05$	11,1	0,370	$27,0 \pm 0,9$
	1,2	$18,03 \pm 0,58$	12,4	0,321	$24,3 \pm 2,7$
	1,8	$17,60 \pm 0,50$	14,3	0,339	$25,3 \pm 1,9$
200	0,6	$18,10 \pm 0,02$	12,9	0,330	$24,8 \pm 0,1$
	1,2	$18,09 \pm 0,12$	13,9	0,334	$25,1 \pm 0,3$
	1,8	$18,09 \pm 0,21$	20,1	0,334	$25,0 \pm 0,8$
250	0,6	$18,11 \pm 0,05$	13,2	0,332	$24,9 \pm 0,3$
	1,2	$18,33 \pm 0,21$	19,8	0,320	$24,3 \pm 0,8$
	1,8	$16,83 \pm 0,31$	19,8	0,377	$27,4 \pm 1,2$
350	0,6	$19,05 \pm 0,05$	14,7	0,290	$22,5 \pm 0,1$
	1,2	$19,06 \pm 0,20$	14,7	0,289	$22,4 \pm 0,2$
	1,8	$19,07 \pm 0,21$	14,7	0,289	$22,4 \pm 0,1$

3 – ESTRUTURA RESULTANTE DO PROCESSO DE PREPARAÇÃO

Como se sabe, independentemente do processo de mistura, quanto maior for a dosagem de cimento maior é a resistência e a rigidez conseguidas. Quanto mais água se adicionar maior vai ser a fluidez (na ausência de adjuvantes). Mantendo a mesma dosagem de cimento é possível obter geometrias para as ligações que variam entre o concentrado e o disperso, bastando para isso aumentar a quantidade de água na mistura. Como exemplo mostra-se na Figura 2 as fotografias tiradas com microscópio de varrimento de electrões (SEM) de provetes de areia após esta ter sido misturada com 150 kg/m³ e com 250 kg/m³ de cimento, adoptando para cada dosagem as relações w/c de 0,6 e de 1,8.

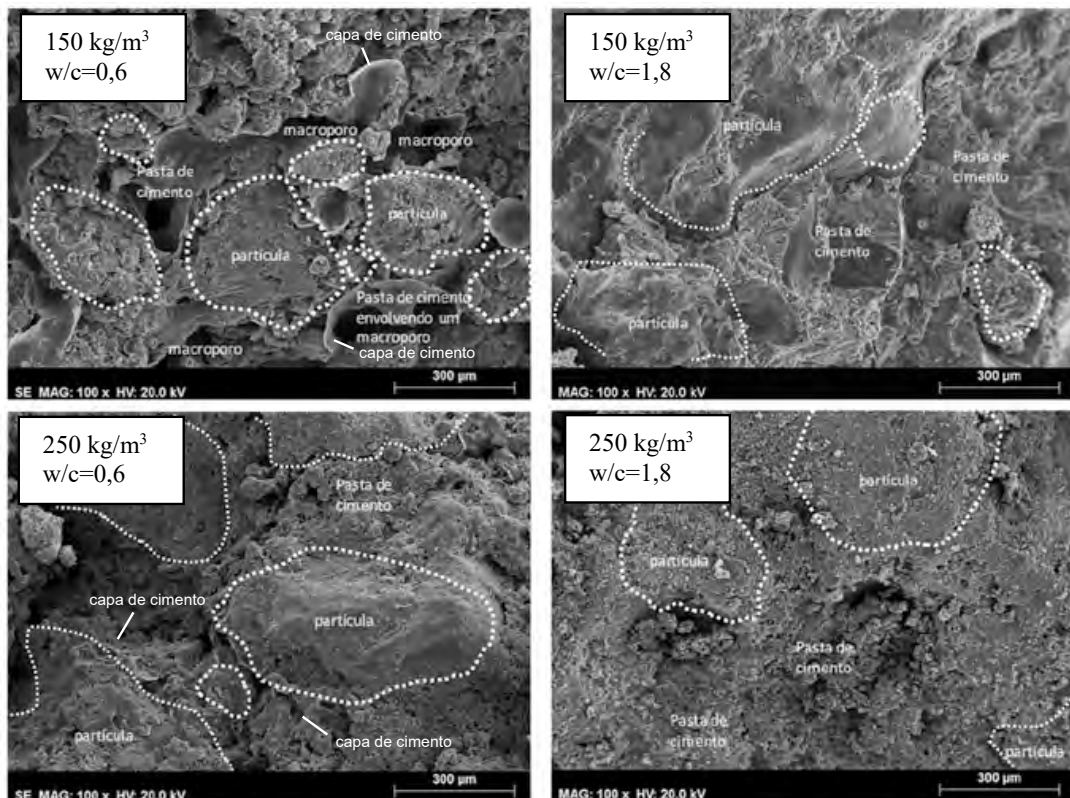


Fig. 2 – Imagens de microscópio após 28 dias de cura, em função da dosagem e de w/c.

É visível na Figura 2 que as ligações são concentradas para as relações w/c de 0,6 (muito evidentes para a dosagem de 150 kg/m³, onde parece que se vê uma espécie de capas de cimento), enquanto que para w/c de 1,8 se vê uma textura mais homogénea (ligações dispersas), onde é difícil distinguir as partículas de areia.

As diferentes estruturas criadas pelo processo de fabrico dos provetes correspondem a diferentes distribuições de tamanho de poros. Estas distribuições podem ser observadas de forma qualitativa através de microscópio e de forma quantitativa através de porosimetrias por intrusão de mercúrio, MIP. A Figura 3 apresenta as curvas das porosimetrias efectuadas para os provetes preparados com 150 kg/m³ e 250 kg/m³ de cimento e w/c de 0,6, 1,2 e 1,8, após 28 dias de cura.

Para os provetes preparados com relação água-cimento de 0,6, o material parece ter dupla porosidade (picos em 10000 nm e 40 nm para 150 kg/m³, e em 20000 nm e 80 nm para 250 kg/m³). O tamanho dos maiores poros diminui com o aumento da quantidade de cimento, o que se pode explicar por maior colmatção dos vazios, já que este pico parece estar associado aos vazios entre os grãos de areia não preenchidos com pasta de cimento. Pode observar-se também que a dupla porosidade tende a desaparecer para relações w/c de 1,2 e 1,8, onde o tamanho dos poros

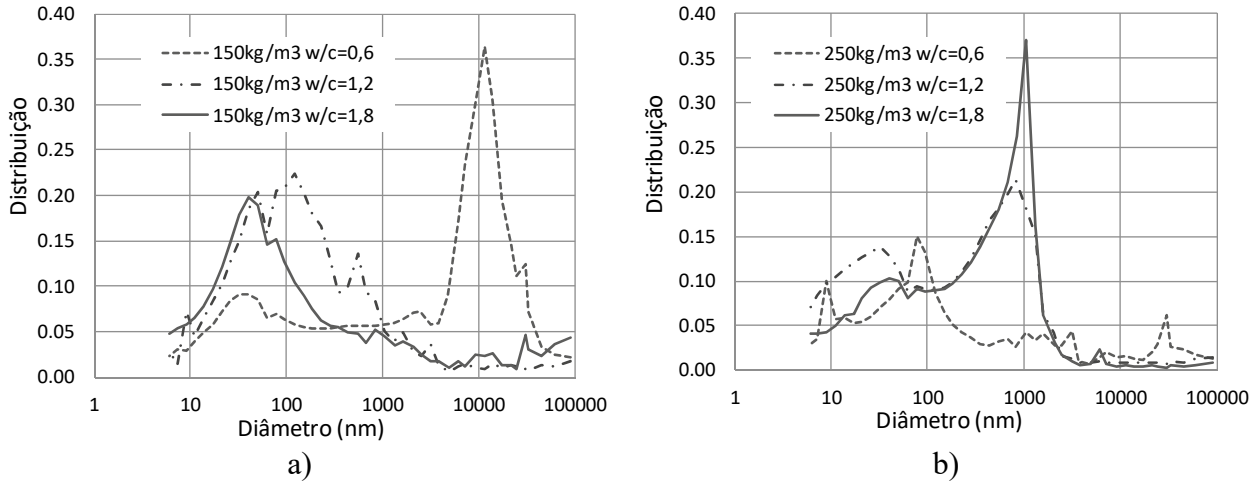


Fig. 3 – Porosimetrias por intrusão de mercúrio para as dosagens: a) 150 kg/m³; b) 250 kg/m³.

dominantes é inferior ao tamanho dos macroporos observado quando w/c é 0,6. Este resultado é esperado, considerando que os vazios entre as partículas de areia ficam preenchidos com quantidades crescentes de pasta de cimento. É uma consequência da preparação dos provetes para manter constante o peso volúmico seco da areia não tratada.

A análise conjunta das imagens de microscópio e das porosimetrias permite uma interpretação para estas ligações, que se ilustra na Figura 4. Quando se usa pouca água o solo está não saturado na mistura (é um solo compactado) e a pasta de cimento concentra-se nos meniscos entre os grãos. Quando se usa muita água esta pode ser suficiente para saturar o solo, e por isso os minerais formam-se de forma dispersa. Deve existir um valor para w/c a partir do qual a geometria deixa de ser concentrada e passa a ser dispersa, e que deve depender não só do índice de vazios mas também da dosagem de cimento. Será para estudar no futuro.

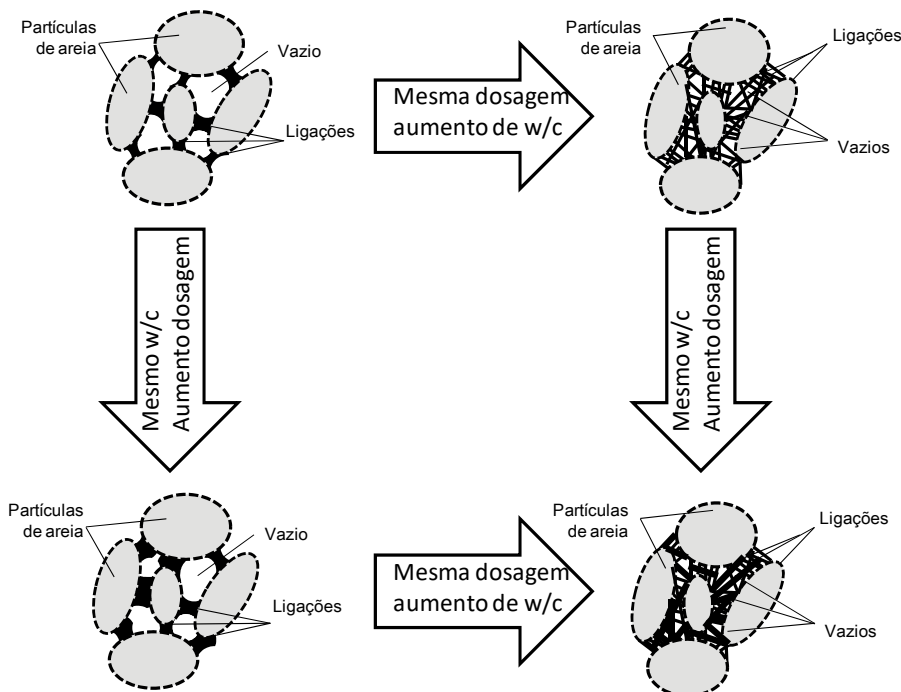


Fig. 4 – Representação esquemática da geometria das ligações consoante a dosagem de cimento e a relação w/c .

4 – COMPORTAMENTO HIDRÁULICO

A permeabilidade saturada foi medida numa câmara de ensaio triaxial seguindo o procedimento normalizado (Cardoso, 2016). Apesar de a cura ser submersa, os provetes foram saturados através de vácuo antes da montagem no equipamento de ensaio, e por aplicação de pressão de água constante, já na câmara. A Figura 5 apresenta os valores medidos para cada relação w/c em função da porosidade dos provetes.

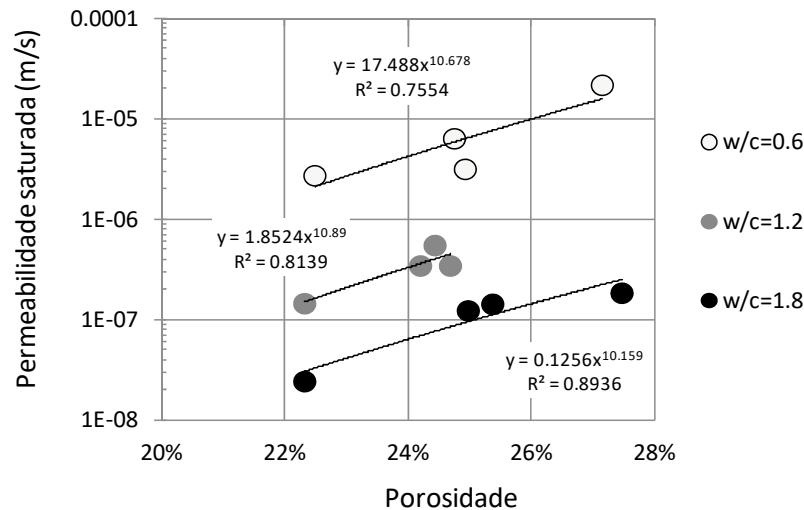


Fig. 5 – Permeabilidade saturada em função da porosidade e da relação w/c na preparação.

Os valores, aumentam com o aumento da porosidade, como seria de esperar. Os valores obtidos para os provetes preparados com w/c de 0,6, com ligações concentradas, são próximos dos valores geralmente encontrados em solos arenosos ($k \approx 1 \times 10^{-5}$ m/s) o que se explica pela presença de poros de grandes dimensões (macroporos). Os valores da permeabilidade diminuem uma ordem de grandeza com o aumento de w/c também devido à redução do tamanho dos macroporos que se observou antes na Figura 3.

Outra forma de avaliar o comportamento hidráulico do solo é através da sua curva de retenção, que traduz a relação entre o grau de saturação, ou teor em água, e a sucção. O raio de curvatura dos meniscos e a sua evolução durante a molhagem e secagem, função da permeabilidade não saturada, depende da geometria dos vazios. Assim, esta geometria reflecte-se na forma da curva próxima da saturação e é traduzida pelo valor de entrada de ar (sucção a partir da qual a fase gasosa passa a ser contínua) (Romero *et al.* 1999).

Existem várias equações possíveis para a curva de retenção, sendo a equação seguinte (Van Genuchten, 1980) a mais conhecida e que se encontra implementada na maior parte dos programas de cálculo comerciais:

$$Sr = \left[1 + \left(\frac{s}{P} \right)^{\frac{1}{1-\lambda}} \right]^{-\lambda} \quad (1)$$

Nesta equação, Sr é o grau de saturação, s é a sucção, P é o valor de entrada de ar e λ é uma constante.

Mediram-se as curvas de retenção para os vários provetes ao fim de 28 dias de cura, tanto para os ramos de secagem como molhagem (Cardoso, 2017). As constantes P e λ foram obtidas por ajuste numérico (Quadro 2) considerando os valores experimentais. A Figura 6 apresenta as curvas obtidas para as dosagens de 150 kg/m^3 e 250 kg/m^3 . Para a elaboração dos gráficos desta figura considerou-se sucção $s=0,01 \text{ MPa}$ para o caso saturado, por simplificação.

Quadro 2 – Parâmetros P e λ obtidos por ajuste numérico.

Dosagem	Ramo	150 kg/m ³		200 kg/m ³		250 kg/m ³		350 kg/m ³	
		Sec.	Molh.	Sec.	Molh.	Sec.	Molh.	Sec.	Molh.
$w/c=0,6$	P (MPa)	0,60	0,01	3,00	0,15	6,00	0,10	7,00	0,30
	λ	0,30	0,25	0,40	0,35	0,40	0,25	0,38	0,25
$w/c=1,2$	P (MPa)	3,00	0,60	4,00	0,50	6,00	0,60	10,00	1,20
	λ	0,35	0,30	0,35	0,28	0,40	0,30	0,45	0,32
$w/c=1,8$	P (MPa)	5,00	0,60	5,00	0,60	7,50	0,70	10,00	1,20
	λ	0,50	0,40	0,40	0,30	0,45	0,33	0,45	0,32

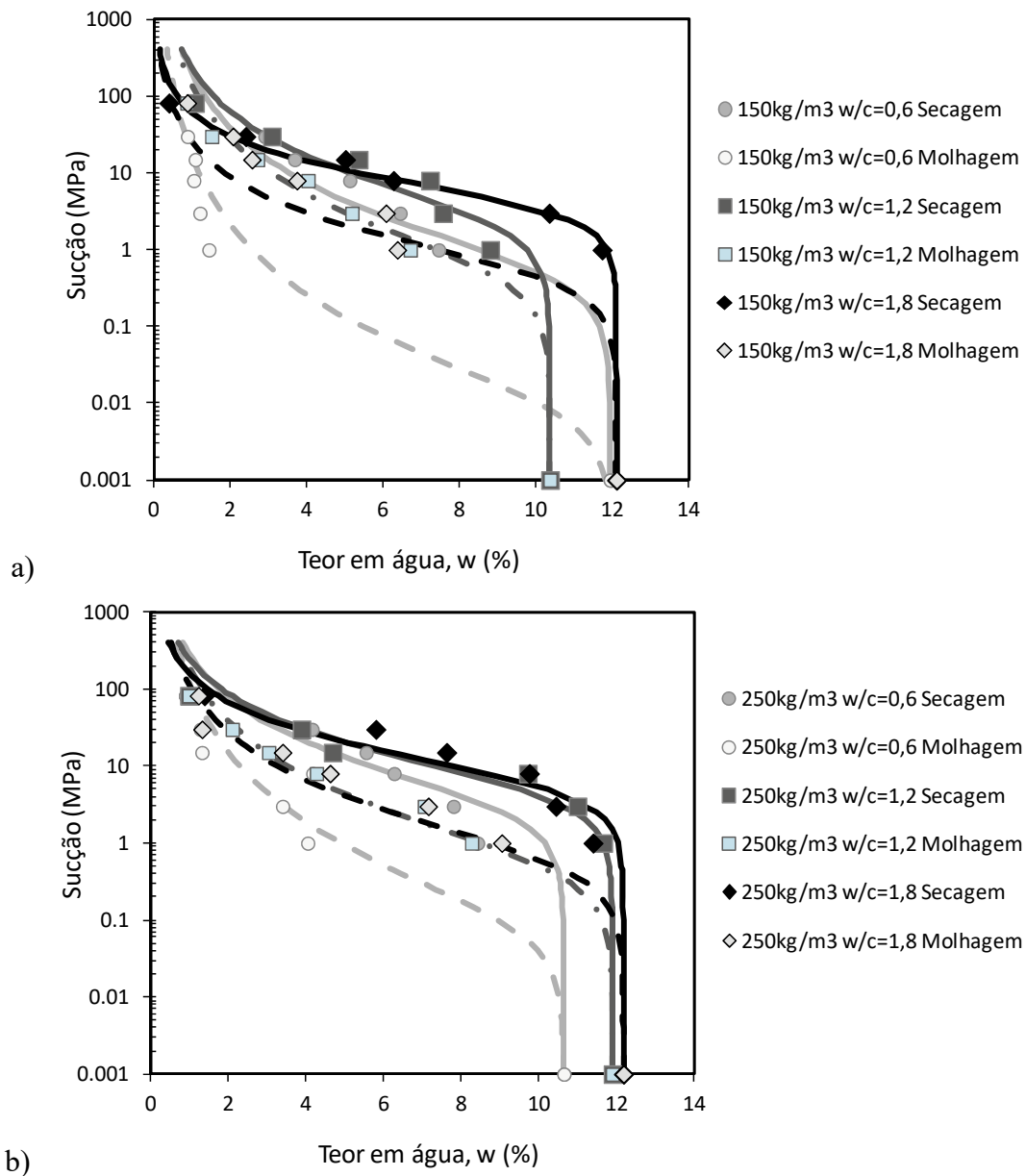


Fig. 6 – Curvas de retenção para as dosagens: a) 150 kg/m³; b) 250 kg/m³.

Pode-se observar na Figura 6 que a forma das curvas é afectada principalmente pelo teor de água na saturação e depende pouco das relações w/c . Apenas para os provetes preparados com a relação água-cimento de 0,6 é que há diferenças marcantes para os dois ramos de secagem e molhagem ou seja, há histerese bem marcada. Para estes casos as curvas são quase verticais no início da molhagem (alta sucção). Esta geometria corresponde a baixos valores de entrada de água (parâmetro P), que se apresentam na Figura 7. Os menores valores para P foram encontrados quando $w/c = 0,6$. Valores reduzidos de P são típicos de solos arenosos (Fredlung e Rahardjo, 1993) e de materiais muito permeáveis, que são os mais fáceis de molhar e secar. Tal indica que a presença das ligações concentradas não altera de forma significativa a estrutura do material arenoso, mas obviamente que as alterações começam a ser relevantes quando a dosagem de cimento aumenta porque os vazios vão ficando cada vez mais pequenos.

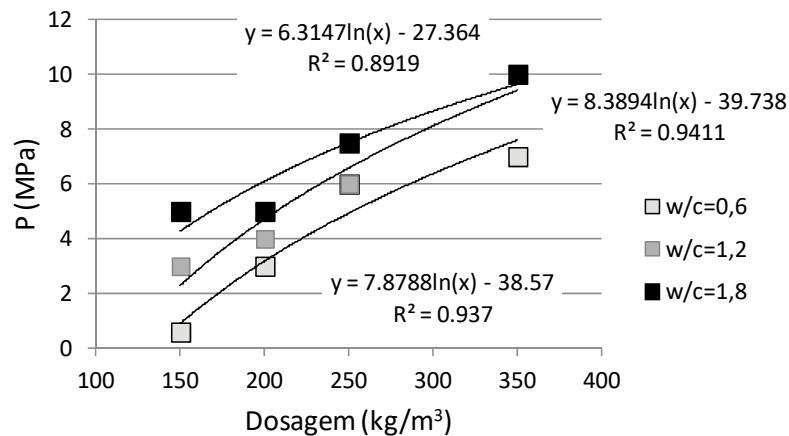


Fig. 7 – Valores do parâmetro P na molhagem em função de w/c na preparação.

Em relação à histerese, esta explica-se pela geometria dos vazios e pelo ângulo de contacto da água ser diferente na molhagem e na secagem. O facto de se ter obtido maior histerese para os provetes com a relação água-cimento de 0,6 mostra que é quando a geometria dos vazios é mais irregular, o que está de acordo com a porosidade dupla encontrada para estas amostras e ilustrada antes na Figura 3.

5 – COMPORTAMENTO MECÂNICO

Os ensaios de compressão simples e de compressão diametral foram realizados de acordo com as normas ASTM D2166-06 (2006) e ASTM D3967-08 (2008), respectivamente. Os ensaios foram realizados em provetes que tinham estado submersos antes da sua montagem nos respectivos equipamentos, de modo a minimizar a influência da sucção nos resultados (procedimento descrito em Cardoso *et al.* 2017). A resistência à tracção foi obtida de forma indirecta através de resultados de ensaios de compressão diametral. Esta abordagem tem algumas simplificações, mas considera-se que estas não têm influência significativa nas conclusões porque a análise dos valores é feita de forma relativa, por comparação entre provetes.

A Figura 8 mostra relação entre w/c e a resistência à compressão simples, e entre w/c e a resistência à tracção, ambas medidas aos 28 dias de idade, para as várias dosagens de cimento estudadas. Como esperado, verifica-se menor resistência, tanto à tracção como à compressão, para os provetes preparados com menores dosagens de cimento. Constata-se que a resistência é inferior nos provetes onde as ligações têm geometria marcadamente concentrada (de uma maneira geral, quando $w/c = 0,6$). Para os provetes onde a geometria das ligações é dispersa, a resistência pode ser comparada à que se observa em betão e argamassas (Neville, 1996, por exemplo). Neste caso foi encontrada maior resistência à compressão para os provetes preparados com $w/c=1,2$ do que com

$w/c=1,8$, o que se explica pelas características da pasta de cimento endurecida. Isto porque as características da argamassa melhoram quando se usa menores quantidades de água na sua preparação, devido a mecanismos de cristalização em torno dos minerais de cimento em suspensão (Horpibulsuk *et al.* 2003).

De acordo com a Figura 8, para cada dosagem existe uma relação água-cimento óptima (neste caso $w/c=1,2$), para a qual se obtiveram os valores máximos para a resistência à compressão e à tracção. Este resultado confirma que a quantidade de água utilizada na mistura é importante e, por essa razão, o teor de água de compactação, ou a fluidez da argamassa usada na injeção, devem ser considerados para obter as propriedades mecânicas finais pretendidas da mistura. Provavelmente, o teor em água óptimo para o qual a resistência é máxima depende da dosagem de cimento. Este comportamento é típico de materiais compactados, e aparentemente pode ser extendido para considerar caldas mais fluidas.

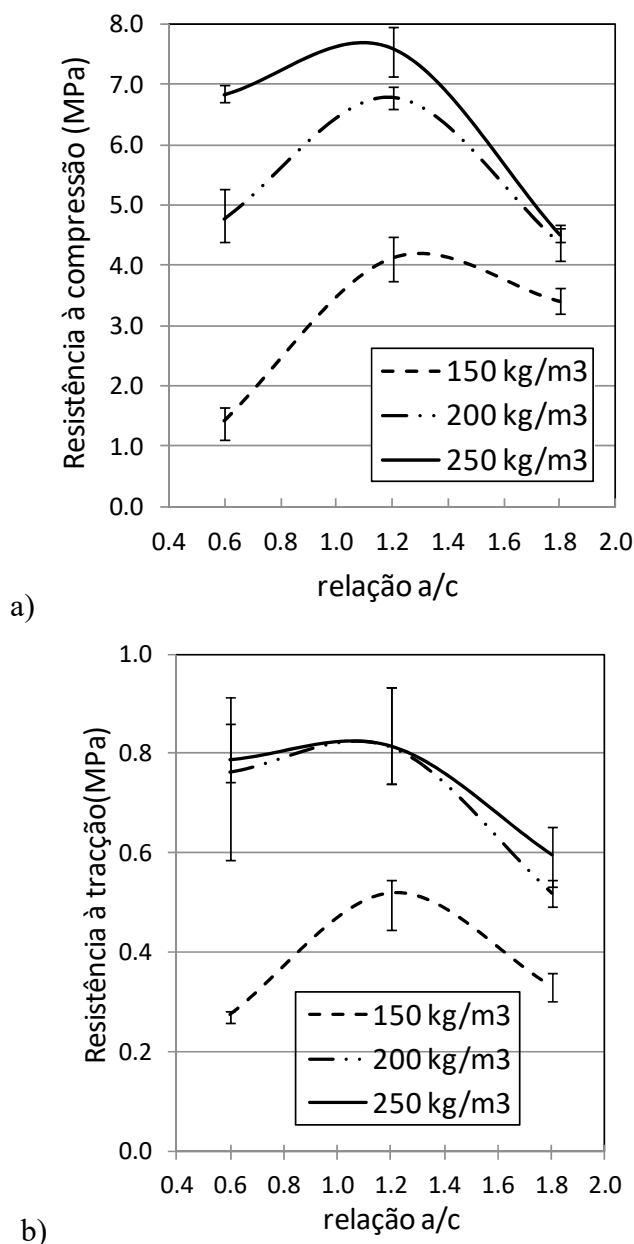


Fig. 8 – Influência da geometria das ligações, quantificada através de w/c , para 28 dias de cura, na: a) resistência à compressão; b) resistência à tracção.

Estes resultados são coerentes com os resultados obtidos por outros autores (por exemplo Consoli *et al.* (2010, 2011), para solos compactados, e Davies e Fendukly (1994) para misturas de solo-cimento). A novidade deste trabalho em relação aos estudos publicados é que se estudaram intervalos de relações w/c com maior amplitude, e que portanto cobrem as várias geometrias de ligações, enquanto que os restantes só cobrem intervalos onde as ligações são concentradas (solos compactados) ou onde são dispersas (argamassas e misturas solo-cimento muito fluidas).

Ao relacionar ambas as resistências com a porosidade (Figura 9) constata-se que a resistência diminui com o aumento da porosidade. No entanto, à excepção dos provetes preparados com w/c de 1,2, parece que a resistência não depende muito da relação w/c da preparação.

Finalmente, ainda de acordo com os dados apresentados na Figura 8, e considerando também os resultados apresentados por Cardoso *et al.* (2017) onde se analisou a sua evolução com o tempo de cura, constata-se que a relação entre a resistência à tracção e à compressão simples é aproximadamente constante (0,12). Esta relação é independente da dosagem e da relação água-cimento adoptada, e também do tempo de cura. Este valor está próximo dos obtidos por outros autores, por exemplo Consoli *et al.* (2011) sugeriram o valor de 0,15.

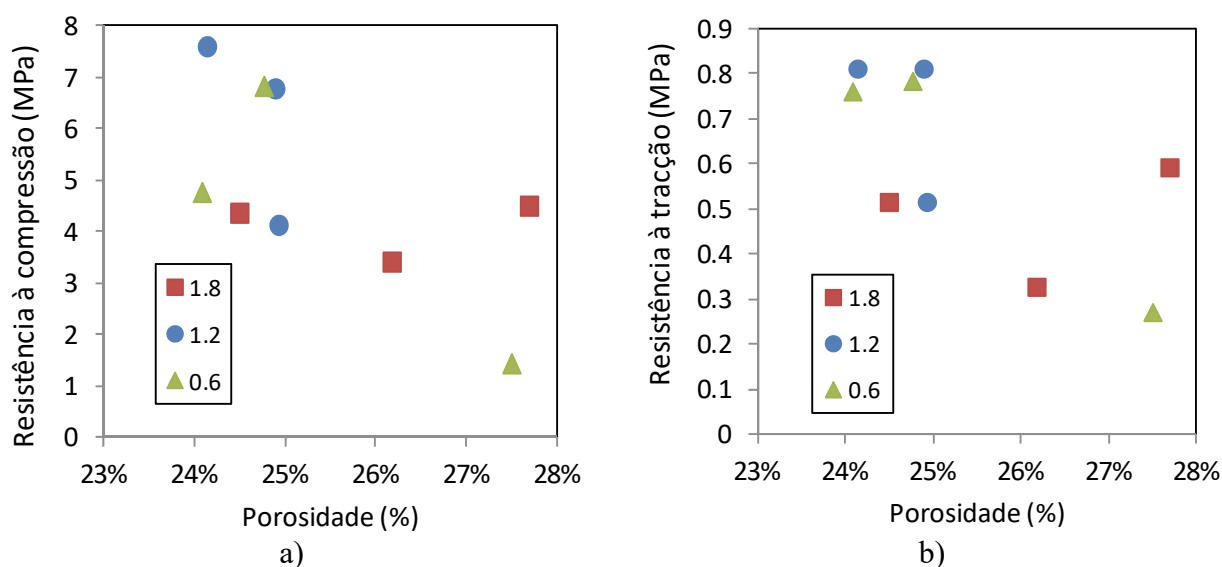


Fig. 9 – Influência da porosidade, para 28 dias de cura, na: a) resistência à compressão (valores médios); b) resistência à tracção (valores médios).

6 – ANÁLISE CONSIDERANDO A PRESENÇA E GEOMETRIA DAS LIGAÇÕES

A maior parte dos estudos existentes procura relacionar a resistências à compressão simples com as dosagens de cimento, porosidades no estado endurecido, ou com a combinação de ambas para considerar o volume de cimento que se encontra a preencher os vazios. Tais abordagens não consideram a geometria das ligações, mas apenas sua presença e quantidade na mistura. Tal é natural porque estes estudos restringem-se a valores de w/c típicos de materiais compactados. Vai-se agora analisar se esta abordagem é válida para as duas geometrias de ligações identificadas neste trabalho, com base nos resultados dos ensaios de compressão simples por serem os mais usuais.

Consoli *et al.* (2010) definiram um parâmetro que considera o volume de vazios ocupado pelos minerais hidratados de cimento,

$$\frac{n}{C_v} = \frac{\left(\frac{V_v}{V}\right)}{\left(\frac{V_c}{V}\right)} = \frac{V_v}{V_c} \quad (2)$$

onde V_v , V_c e V são o volume de vazios, o volume preenchido por cimento e o volume total, respectivamente, n é a porosidade e C_v é o volume de cimento em relação ao volume total. O volume de cimento V_c é obtido pela expressão:

$$V_c = \frac{W_c}{\gamma_c} \quad (3)$$

onde W_c é o peso de cimento e γ_c é o peso volúmico das partículas de cimento ($\gamma_c=31 \text{ kN/m}^3$). Este volume não considera o volume ocupado pelos minerais de cimento após hidratação, que depende da água da mistura. Assim, o parâmetro n/C_v não permite considerar a geometria mas apenas a presença das ligações. Este parâmetro é tanto menor quanto maior for a quantidade de ligações, porque a porosidade diminui.

A Figura 10 apresenta a análise efectuada aos valores da resistência à compressão simples em função do parâmetro n/C_v para os provetes ensaiados. Foi feita a análise fixando w/c (Fig. 10a) ou a dosagem (Fig. 10b), e considerando valores médios. Constatase que n/C_v é praticamente constante para cada dosagem (mais visível na Fig. 10b), identificando correctamente a presença de ligações porque estas existem em quantidade directamente proporcional à quantidade de cimento. Fixando n/C_v verifica-se que a resistência varia bastante em função de w/c (Fig. 10a) e por isso a geometria das ligações deve ser considerada. Pode-se assim concluir que o parâmetro n/C_v considera bem a presença de cimento mas não a geometria ocupada por este após hidratação. Assim, a geometria das ligações é importante, e não só a sua presença.

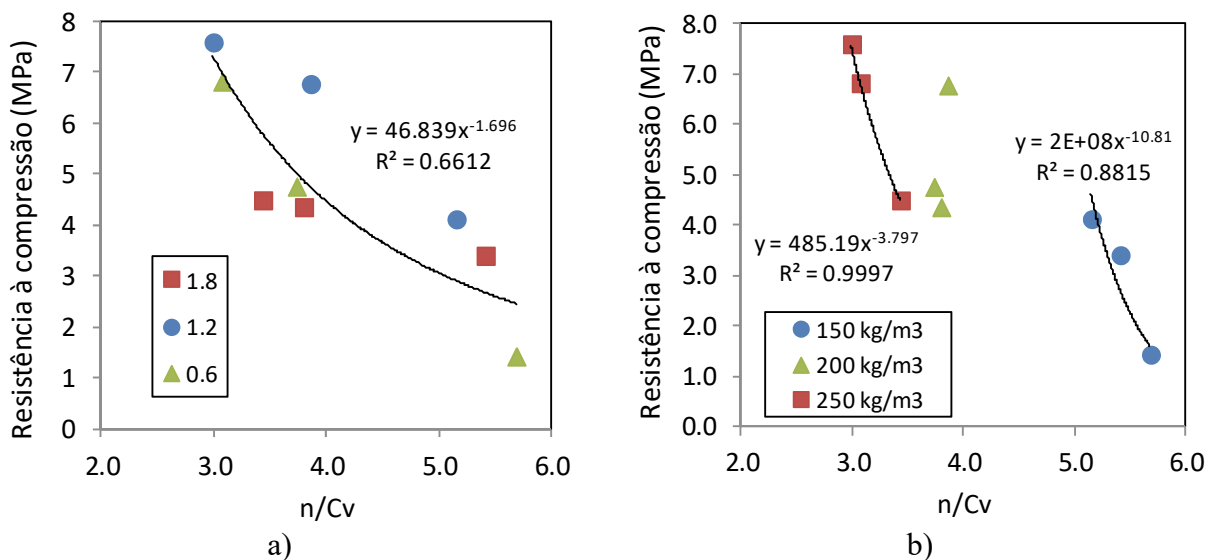


Fig. 10 – Uso do parâmetro n/C_v para interpretar os resultados dos ensaios à compressão simples aos 28 dias considerando: a) todos os ensaios; b) cada dosagem individualmente.

7 – CONCLUSÕES

A consideração das diferentes geometrias das ligações ajuda a compreender melhor o comportamento mecânico e hidráulico de misturas de solo-cimento depois de endurecidas.

Considerando as características hidráulicas, a permeabilidade diminui se a dimensão dos vazios se reduz significativamente, o que acontece se as ligações são dispersas, ou seja, se w/c é muito elevada. A análise do valor de entrada de ar da curva de retenção, em particular no ramo de molhagem, está também de acordo com esta observação. A resistência tanto à tracção como à compressão dependem mais da dosagem de cimento do que de w/c , no entanto a quantidade de água usada também afecta estes valores porque considera a qualidade e resistência da pasta de cimento endurecida das ligações.

O parâmetro n/C_v traduz a presença de cimento nos vazios do solo e tem sido usado para efeitos de comparação entre várias dosagens, mas foi testado apenas em provetes de areia compactada, ou seja, em provetes com baixas dosagens de cimento e pouca quantidade de água na preparação. Para os casos de pavimentos em que se adoptam dosagens menores do que as testadas é de esperar comportamento semelhante ou ainda mais contrastante em relação ao observado para as maiores dosagens e relações w/c . Se a geometria das ligações não fosse importante, seria de esperar valores idênticos para a resistência para os mesmos valores de n/C_v , mas tal não se verifica pois esta depende de w/c . Assim, de uma forma geral não é suficiente considerar a presença da pasta de cimento endurecida, mas deve-se considerar também a sua geometria, ou seja, da quantidade de água usada na preparação da calda de cimento a misturar ao solo. No entanto, se generalizado a várias dosagens e relações w/c , este parâmetro permitirá definir a relação w/c óptima para um dado solo e é conceptualmente mais correcta do que afectar a análise dos valores da resistência em função de w/c como se se tratasse de uma curva de compactação, particularmente quando o solo passa a estar saturado após a adição do ligante.

AGRADECIMENTOS

A autora agradece ao Doutor Daniel Ribeiro, aos Engenheiros Raquel Neri e Henrique Oliveira e ao Sr José Alberto Reis a ajuda para a obtenção dos dados experimentais apresentados neste artigo.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ASTM D2166-06 (2006). *Standard Test Method for Unconfined Compressive Strength of Cohesive Soil*. American Standard for Testing Materials, EUA.
- ASTM D3967-08 (2008). *Standard Test Method for Splitting Tensile Strength of Intact Rock Core Specimens*. American Standard for Testing Materials, EUA.
- Cardoso, R. (2016). *Porosity and tortuosity influence on geophysical properties of an artificially cemented sand*. *Engineering Geology*, 211 (23), pp. 198–207.
- Cardoso, R. (2017). *Influence of water-cement ratio on the hydraulic behavior of an artificially cemented sand*. *Journal of Geotechnical and Geological Engineering*, 33, pp. 1513-1527.
- Cardoso, R.; Ribeiro, D.; Néri, R. (2017). *Bonding effect on compressive e tensile strength of sand-cement mixtures*. *Soils and Foundations*, 57, pp. 655–668.
- Consoli, N.; Cruz, R.; Floss, M.; Festugato, L. (2010). *Parameters controlling tensile e compressive strength of artificially cemented sand*. *J. Geotech. Geoenviron. Engineering*, 136, pp. 759-763.
- Consoli, N.; Rosa, D.; Cruz, R.; Rosa, A. (2011). *Water content, porosity e cement content as parameters controlling strength of artificially cemented silty soil*. *Engineering Geology*, 122, pp. 328-333.

- Davies, J.; Fendukly, L. (1994). *Behavior of soil-cement specimens in unconfined dynamic compression*. Journal of Materials Science, 29, pp. 3255-3260.
- El Euch, S.; Neji, J.; Loulizi, A. (2010). *Compacted Sand Concrete in Pavement Construction: An Economical and Environmental Solution*. Aci Materials Journal, 107(2):195-202.
- Fredlund, D.G.; Rahardjo, H. (1993). *Soil Mechanics for Unsaturated Soils*. John Wiley e Sons, New York.
- Fang, Y.; Chung, Y.; Yu, F.; Chen, T. (2001). *Properties of soil-cement stabilized with deep mixing method*. Ground Improvement, 5(2), pp. 69-74.
- Gajo, A.; Cecinato, F.; Hueckel, T. (2015). *A micro-scale inspired chemo-mechanical model of bonded geomaterials*. International Journal of Rock Mechanics e Mining Sciences, 80, pp. 425-438.
- Gens A.; Nova R. (1993). *Conceptual bases for a constitutive model for bonded soils e weak rocks*. Geotechnical Engineering of Hard Soils – Soft Rocks, Balkema, Rotterdam, pp. 485-494.
- Horpibulsuk, S.; Miura, N.; Nagaraj, T.S. (2003). *Assessment of strength development in cement-admixed high water content clays with Abrams' law as a basis*, Geotechnique, 53(4), pp. 439-444.
- Neville, A.M. (1996). *Properties of concrete*. Fourth e final edition standards. Pearson, Prentice Hall
- Porbaha, A.; Shibuya, S.; Kishida, T. (2000). *State of the art in deep mixing technology. Part III: geomaterial characterization*. Ground Improvement, 4(3), pp. 91-100.
- Ribeiro, D.; Maranhã, J.; Cardoso, R. (2016). *Modelling the mechanical behaviour of sand-cement mixtures*. 15º Congresso Nacional de Geotecnia, Porto - prêmio Jovens Geotécnicos em Língua Inglesa.
- Romero, E.; Gens, A.; Lloret, A. (1999). *Water permeability, water retention and microstructure of unsaturated compacted Boom clay*. Engineering Geology, 54, pp. 117-127.
- Van Genuchten, M. T. (1980). *A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils*. Soil Sci. Soc. Am. J., 44, pp. 892-898.