ESTUDO LABORATORIAL DE MISTURAS DE SOLO-CIMENTO PARA APLICAÇÃO EM JET GROUTING

LABORATORIAL STUDY OF SOIL-CEMENT MIXTURES FOR APLICATION IN JET GROUTING

Valente, Tiago, *TecMinho, Guimarães, Portugal, tiagovalente@civil.uminho.pt*
Gomes Correia, A., *Universidade do Minho, Guimarães, Portugal, agc@civil.uminho.pt*
Machado do Vale, José, *Somague Engenharia, Sintra, Portugal, JLMachadoVale@somague.pt*
Barata, J., *Tecnasol FGE, Amadora, Portugal, JBarata@tecnasol-fge.pt*
Cebola, Duílio, *Edifer, Amadora, Portugal, dcebola@edifer.pt*
Coelho, Sandra, *Tecnasol FGE, Amadora, Portugal, scoelho@tecnasol-fge.pt*

RESUMO

Neste artigo é apresentado o estudo laboratorial de formulações de solo-cimento para suporte da realização de colunas teste de Jet Grouting. São apresentados os resultados dos ensaios de caracterização das formulações estudadas, nomeadamente a resistência à compressão simples (450 provetes), módulos de deformabilidade inicial, máximo, tangente e secante a 50% (18 provetes) e a massa volúmica das misturas de solo-cimento (468 provetes). Os módulos de deformabilidade foram obtidos através da técnica de medição local recorrendo ao uso de LDT's. Dos resultados obtidos foi possível obter várias relações entre as propriedades mecânicas e entre estas e as propriedades físicas estudadas, as quais se julga virem a constituir uma base de dados importante para futuras aplicações em condições comparáveis.

ABSTRACT

In this paper is presented a laboratorial study of different formulations of soil-cement mixtures to support field trial of Jet Grouting columns. Laboratorial tests results of mechanical and physical characterization are discussed, specifically the uniaxial compressive strength (450 specimens), initial, maximum, secant ant tangent to 50% stiffness moduli (18 specimens) and density of the soil-cement mixtures (468 specimens). The stiffness moduli were obtained using the technique of measurement of the local deformations of the samples with LDT's. The results were able to validate the possibility to use some studied soil-cement formulations in Jet Grouting columns. It was also possible to establish some relations between the mechanical properties and between the mechanical and physical properties, which could represent an important database for future applications in similar situations.

1. INTRODUÇÃO

A técnica de Jet Grouting está integrada nas técnicas de melhoramento de solos. Trata-se de uma técnica onde são produzidos elementos estruturais de solo-cimento com diversas geometrias (colunas, painéis, lajes) pela injecção de um jacto fluído com elevada energia, que promove a desagregação, mistura e substituição parcial do solo por um agente cimentício. A eficácia de tratamento desta técnica depende do tipo de solo a tratar, dos parâmetros de execução da técnica e do tipo de sistema de Jet Grouting utilizado no tratamento do solo.

Os parâmetros de execução da técnica de Jet Grouting passam pela definição das pressões e caudais a aplicar aos fluidos de injecção, número e diâmetro dos bicos de injecção, razão

água/cimento da calda de cimento, e velocidade de subida e rotação da vara. A escolha dos parâmetros de execução a utilizar nesta técnica, deve ser auxiliado por um estudo em laboratório das formulações para projectar as misturas a utilizar em obra, permitindo uma análise técnico-económica das mesmas. O desempenho das formulações é avaliado através da caracterização mecânica (resistência e deformabilidade) e física (massa volúmica e permeabilidade) de provetes de solo-cimento.

Contudo, o estudo laboratorial é só por si insuficiente para reproduzir completamente as propriedades mecânicas e físicas "in-situ", sendo necessária a realização de colunas de teste para o ajustamento das formulações definidas em laboratório.

Comparativamente com outras técnicas de melhoramento de solos, a técnica de Jet Grouting possui uma maior flexibilidade de aplicabilidade, podendo ser utilizada com sucesso em vários tipos de solos desde argilosos a arenosos, com elevada ou baixa permeabilidade (Pearlman 1998, Giménez 2004). Esta técnica pode ainda ser aplicada em qualquer direcção e nos estratos do solo estritamente necessários (Falcão et al. 2000), sendo utilizada com sucesso no reforço de fundações de estruturas, sendo várias as aplicações existentes de reforço de fundações de edifícios históricos e correntes, obras-de-arte, estruturas rodoviárias e ferroviárias, e túneis.

2. CASO DE ESTUDO EM LABORATÓRIO DE FORMULAÇÕES DE SOLO-CIMENTO

2.1. Materiais e programa de ensaios

Neste estudo foram realizadas formulações a utilizar em colunas de Jet Grouting, a aplicar num solo com as características seguintes: limite de liquidez, ω_L= 51%; índice de plasticidade, IP= 26%; massa volúmica seca, ρ_d =777 kg/m^3; teor em água natural, ω= 69%. O referido estudo insere-se no âmbito de um protocolo de colaboração estabelecido entre a empresa "TECNASOL-FGE" e a empresa "TECMINHO". O solo é de natureza lodosa (argila orgânica OH) e foi colhido num terreno situado em Lisboa, no Parque das Nações.

Para o estudo das formulações, foi proposta a utilização de dois tipos de cimento, CEM I 42,5R e CEM IV/A (V) 32,5R, ambos da marca "SECIL", tendo sido realizado um estudo de caracterização de cada um deles. Além disso, foi ainda avaliada a adequabilidade de utilização de água do Rio Tejo para a execução das colunas de Jet Grouting. Foi também estudada a influência da utilização de um aditivo superplastificante e de um aditivo redutor de viscosidade.

Tendo em vista obter 3 MPa de resistência à compressão simples, 1GPa do módulo deformabilidade secante a 50% e uma massa volúmica de 1700kg/m^3, foi proposto o estudo e caracterização das formulações indicadas no Quadro 1.

Neste contexto o programa de ensaios foi dividido em 3 fases:

Fase 1 – Estudo da caracterização dos cimentos a utilizar;

Fase 2 – 1ª etapa da determinação da resistência mecânica e das propriedades físicas das formulações estudadas;

Fase 3 – 2ª etapa da determinação das propriedades mecânicas e físicas das formulações estudadas.

Quadro 1 – Formulações estudadas.

Nº	Tipo de Cimento	Composição da Calda de Cimento (kg de cimento/m^3 de calda)	Relação da mistura em peso		Aditivos	Relação W/C	Conversão para kg cimento/ m^3 de solo (ρ_{tsolo}=1300kg/m^3)
			% Calda de Cimento	% Solo			
1	IV/A (V) 32,5 R	500	50	50	-----	1,67	486
2	IV/A (V) 32,5 R	500	50	50	Superplastificante (SP)	1,67	486
3	IV/A (V) 32,5 R	500	50	50	Redutor Viscosidade (RV)	1,67	486
4	IV/A (V) 32,5 R	500	70	30	-----	1,67	1136
5	IV/A (V) 32,5 R	500	70	30	Superplastificante	1,67	1136
6	IV/A (V) 32,5 R	500	70	30	Redutor Viscosidade	1,67	1136
7	IV/A (V) 32,5 R	700	50	50	-----	1,11	616
8	IV/A (V) 32,5 R	700	70	30	-----	1,11	1438
9	IV/A (V) 32,5 R	1000	50	50	-----	0,68	774
10	IV/A (V) 32,5 R	1000	50	50	Superplastificante	0,68	774
11	IV/A (V) 32,5 R	1000	50	50	Redutor Viscosidade	0,68	774
12	IV/A (V) 32,5 R	1000	70	30	-----	0,68	1806
13	IV/A (V) 32,5 R	1000	70	30	Superplastificante	0,68	1806
14	IV/A (V) 32,5 R	1000	70	30	Redutor Viscosidade	0,68	1806
15	I 42,5 R	700	50	50	-----	1,12	613
16	I 42,5 R	700	70	30	-----	1,12	1431
17	I 42,5 R	1000	50	50	-----	0,69	769
18	I 42,5 R	1000	50	50	Superplastificante	0,69	769
19	I 42,5 R	1000	50	50	Redutor Viscosidade	0,69	769
20	I 42,5 R	1000	70	30	-----	0,69	1795
21	I 42,5 R	1000	70	30	Superplastificante	0,69	1795
22	I 42,5 R	1000	70	30	Redutor Viscosidade	0,69	1795

2.2. Estudo da caracterização dos cimentos

Foi realizado um estudo de caracterização dos cimentos a utilizar nas formulações de solo-cimento, tendo-se avaliado vários parâmetros físicos dos cimentos (massa volúmica, superfície específica, resíduo a 90µm), tendo ainda sido realizados ensaios de determinação de início e fim de presa, expansibilidade e a resistência à compressão e à flexão. As amostras para os ensaios foram realizadas com água potável e com água recolhida do Rio Tejo, de modo a estudar-se a influência da última nas propriedades estudadas.

Da análise dos resultados dos ensaios apresentados no Quadro 2, pode-se concluir que: (1) A utilização de água do Rio Tejo não influencia as resistências mecânicas dos cimentos; (2) Foram obtidos valores elevados de resistência à flexão e compressão aos 28 dias para o CEM IV/A (V) 32,5R, que poderão resultar da maior finura deste cimento; (3) Os tempos de presa não se alteram significativamente quando determinados com água do Rio Tejo.

Sendo assim, nas fases subsequentes do programa de ensaios foi utilizada água potável na realização das formulações de solo-cimento.

Quadro 2 – Resultados dos ensaios de caracterização dos dois tipos de cimento.

Ensaio	Norma	CEM I 42,5 R	CEM IV/A (V) 32,5 R	Ensaio	Norma	CEM I42,5 R	CEM IV/A (V) 32,5 R
Massa volúmica	NP EN 196-6	3.25g/cm^3	3.05g/cm^3	**$R_{F,M}$ - 2 dias**	NP EN 196-1	6.9 MPa (5.7 %)†	4.4 MPa (6.56 %)†
Superfície específica	NP EN 196-6	4479cm^2/g	4489cm^2/g	**$R_{F,M}$ - 7 dias**		8.4 MPa (11.6%)†	6.9 MPa (11.8%)†
Resíduo a 90 um	NP EN 196-6	0.5 %	0.3 %	**$R_{F,M}$ - 28 dias**		9.1 MPa (11.0%)†	9.5 MPa (2.9 %)†
Início de presa	NP EN 196-3	153min	92min	**$R_{C,M}$ - 2 dias**		35.4 MPa (2.9%)†	20.4 MPa (4.8 %)†
		180min*	136min*				
Fim de presa	NP EN 196-3	190min	150min	**$R_{C,M}$ - 7 dias**		43.3 MPa (2.9%)†	31.7 MPa (5.4 %)†
		225min*	192min*	**$R_{C,M}$ - 28 dias**		52.3 MPa (1.7%)†	57.2 MPa (1.8%)†
Expansibilidade	NP EN 196-3	0.5mm	0.5mm				

*** Amassaduras realizadas com água potável**

†- Coeficiente de variação

2.3. Determinação da resistência mecânica e propriedades físicas das formulações - 1ª etapa

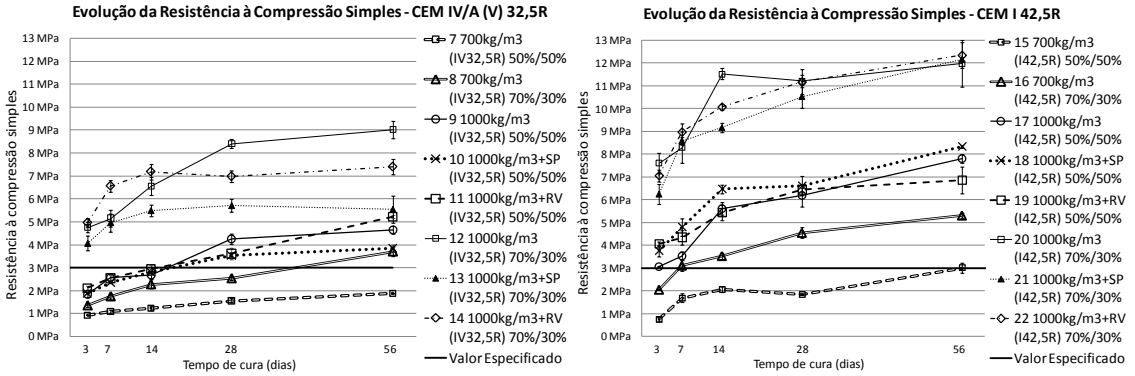
Nesta fase do programa de ensaios procedeu-se à determinação da resistência à compressão simples e massa volúmica de provetes cilíndricos com 29mm de diâmetro e 60mm de altura. Foram realizados 450 provetes para a determinação da resistência à compressão simples aos 3, 7, 14, 28 e 56 dias de idade e para a determinação da massa volúmica. Para cada uma das idades, foram ensaiados 3 ou mais provetes para a realização dos referidos ensaios.

O procedimento de realização dos provetes consistiu na realização da calda de cimento com as características indicadas no Quadro 1, sendo de seguida realizada a sua mistura com o solo nas proporções também indicadas no Quadro 1, recorrendo a uma misturadora mecânica durante cerca de 5 minutos. De seguida foi realizada a moldagem dos provetes sem qualquer tipo de compactação.

Os resultados obtidos mostram que as massas volúmicas das formulações estudadas apenas se aproximam ligeiramente do valor pretendido (1700 kg/m^3). Verificou-se ainda uma tendência de diminuição da massa volúmica da mistura à medida que a quantidade de cimento na mistura diminui. O valor da massa volúmica das formulações é inferior ao valor pretendido, podendo este facto ser explicado pelo baixo valor da massa volúmica do solo em estudo.

Na Figura 1 são apresentados os resultados dos ensaios de determinação da resistência à compressão simples. A análise destes resultados permite concluir que: (1) As formulações realizadas com calda de cimento constituída por 500 kg/m^3 apresentam valores de resistência à compressão simples muito inferiores ao valor requerido; (2) As formulações realizadas com cimento CEM I 42,5R apresentam valores de resistência à compressão simples superiores às mesmas formulações realizadas com o cimento CEM IV/A (V) 32,5R; (3) As formulações com maiores taxas de utilização de calda de cimento na mistura final apresentam uma resistência superior às formulações com menores taxas de utilização de calda de cimento; (4) Das formulações realizadas com uma calda de cimento com 700 kg/m^3, apenas a formulação com 70% de calda de cimento e 30% de solo e utilizando cimento CEM I 42,5R cumprem o valor requerido de 3 MPa aos 28 dias; (5) Todas as formulações realizadas com calda de cimento com 1000 kg/m^3 apresentam valores de resistência à compressão simples superiores aos 3 MPa de resistência à compressão simples aos 28 dias, evidenciando-se as formulações nº20, 21 e 22 que apresentam uma resistência três vezes superior à necessária; (6) O uso dos aditivos não apresenta qualquer influência perfeitamente notória no valor da resistência à compressão simples dos provetes.

Dos ensaios realizados nesta fase, foram escolhidas três formulações que cumprem o valor especificado de resistência à compressão simples, para o estudo da 3ª fase (2ª etapa dos ensaios de caracterização das propriedades mecânicas).



(a) (b)

Figura 1 – Evolução da resistência à compressão simples dos provetes realizados com o cimento do tipo (a) CEM IV/A (V) 32,5R e (b) CEM I 42,5R.

2.4. Determinação das propriedades mecânicas e físicas das formulações - 2ª etapa

Complementarmente ao realizado na 2ª fase, a 3ª fase incidiu na determinação dos módulos de deformabilidade das formulações: A–1000kg/m^3+SP (CEM I42,5R) 50%/50%; B–700kg/m^3 (CEM I 42,5R) 70%/30%; C–700 kg/m^3 (CEM I42,5R)50%/50%.

Para tal foram realizados provetes cilíndricos com 100mm de diâmetro e 200mm de altura, correspondendo a cada formulação 6 provetes. Foi programada a determinação do módulo de elasticidade inicial (E_0) para as idades de 3, 7, 14 e 28 dias, não conduzindo os provetes à rotura. Para os 56 dias de cura foi programada a determinação do E_0 para 3 provetes de cada formulação. Para os 56 e 84 dias de cura foi programado determinar o módulo de deformabilidade máximo (E_{MAX}), módulo de deformabilidade tangente e secante a 50% da tensão máxima ($E_{tg50\%}$ e $E_{sec50\%}$) a 3 provetes de cada formulação, para cada tempo de cura mencionado.

O procedimento de realização dos provetes foi semelhante ao indicado anteriormente. Para a realização destes ensaios foi utilizado equipamento de medição local das deformações dos provetes, através da colocação de 3 LDT's (Local Deformation Transducer) afastados de 120º, do tipo dos usados nos ensaios triaxiais de precisão (Gomes Correia et al. 2006).

O parâmetro E_0 foi obtido através da realização de ensaios cíclicos não-destrutivos, onde os provetes são sujeitos a uma carga correspondente a 1/7 da tensão máxima, de modo a não provocar deformações permanentes no provete A curva tensão-extensão foi obtida através da média das extensões dos três LDT's, onde o valor E_0 é determinado pelo declive do tramo linear-elástico da curva tensão-extensão. O ensaio de determinação de $E_{sec50\%}$, $E_{tg50\%}$ e E_{MAX} relativamente a E_0 apenas se diferenciou pelo carácter monotónico do ensaio, conduzindo os provetes à rotura, onde $E_{sec50\%}$ é determinado através da razão entre a tensão correspondente a 50% da tensão máxima e a extensão média do provete para a respectiva tensão ($\varepsilon_{50\%}$). O $E_{tg50\%}$ corresponde ao declive da tangente da curva tensão-extensão no ponto correspondente a 50% da tensão máxima, e o E_{MAX} corresponde ao valor máximo do módulo de deformabilidade tangente observado em toda a curva tensão-extensão, coincidindo por vezes com E_0. No presente artigo apenas se apresentam os resultados dos $E_{tg50\%}$ e $E_{sec50\%}$.

No Quadro 3 apresenta-se a evolução ao longo do tempo de $E_{sec50\%}$ e $E_{tg50\%}$ e estes mesmos valores, incluindo $\varepsilon_{50\%}$ e a resistência à compressão simples (Q_{ult}) para determinados tempos de cura. Pode-se concluir que, tal como esperado, os valores dos módulos de deformabilidade são maiores, quanto maior é a dosagem de cimento da respectiva calda usada, bem como quanto maior é a percentagem de calda de cimento na mistura final. Pode-se ainda verificar que as três formulações estudadas apresentam valores de $E_{sec50\%}$ bastante superiores ao especificado (1GPa).

Quadro 3 – Resultados dos ensaios de determinação de E_{MAX} , $E_{sec50\%}$, $E_{tg50\%}$, $\varepsilon_{50\%}$ e Q_{ult} .

Formulação	Provete	$E_{sec50\%}$ (GPa)				$E_{tg50\%}$(GPa)				$\varepsilon_{50\%}$ (‰)	Q_{ult} (MPa)				Massa Volúmica após imersão em H_20 (kg/m^3)	
		56 dias		84 dias		56 dias		84 dias			56 dias		84 dias			
A – 1000 kg/m^3+ SP (CEM I42,5R) 50%/50%	A1		3,1 (2%)†	3,1	3,2 (3%)†		2,6 (3%)†	2,8	2,8 (2%)†	1,13		6,6 (5%)†	7,0	7,2 (2%)†	1578	1603
	A2			3,2				2,7		1,12			7,2		1624	
	A3			3,3				2,8		1,12			7,3		1642	
	A4	-*				-*				-*	6,8				1597	
	A5	3,1				2,6				1,02	6,2				1589	
	A6	3,0				2,5				1,11	6,7				1590	
B - 700 kg/m^3 (CEM I42,5R) 70%/30%	B1		2,9 (3%)†	2,8	2,8 (2%)†		2,6 (8%)†	2,9	2,7 (6%)†	0,88		4,9 (2%)†	4,9	5,1 (7%)†	1529	1549
	B2			2,8				2,6		0,98			5,5		1549	
	B3			2,9				2,6		0,83			4,8		1539	
	B4	3,0				2,7				0,81	4,8				1478	
	B5	2,8				2,4				0,87	5,0				1532	
	B6	2,9				2,8				0,80	4,8				1665	
C - 700 kg/m^3 (CEM I42,5R) 50%/50%	C1		1,6 (9%)†	1,9	1,8 (3%)†		1,4 (8%)†	1,7	1,7 (0%)†	0,74		2,4 (10%)†	2,8	2,8 (2%)†	1501	1500
	C2			1,8				1,7		0,76			2,7		1502	
	C3			1,8				1,7		0,79			2,8		1493	
	C4	1,5				1,3				0,82	2,4				1496	
	C5	1,8				1,5				0,76	2,7				1505	
	C6	1,6				1,3				0,66	2,2				1503	

* - Devido a problemas na instrumentação do provete não foi possível determinar o E_{MAX}, $E_{sec50\%}$, $E_{tg50\%}$.
† - Coeficiente de variação

2.5. Correlações entre propriedades físicas e mecânicas

Na Figura 2 é apresentada a relação entre a resistência à compressão simples e massa volúmica, de onde se pode identificar uma tendência claramente linear entre os dois parâmetros, verificando que uma mistura com uma maior massa volúmica apresenta uma maior resistência à compressão simples, para o solo em estudo.

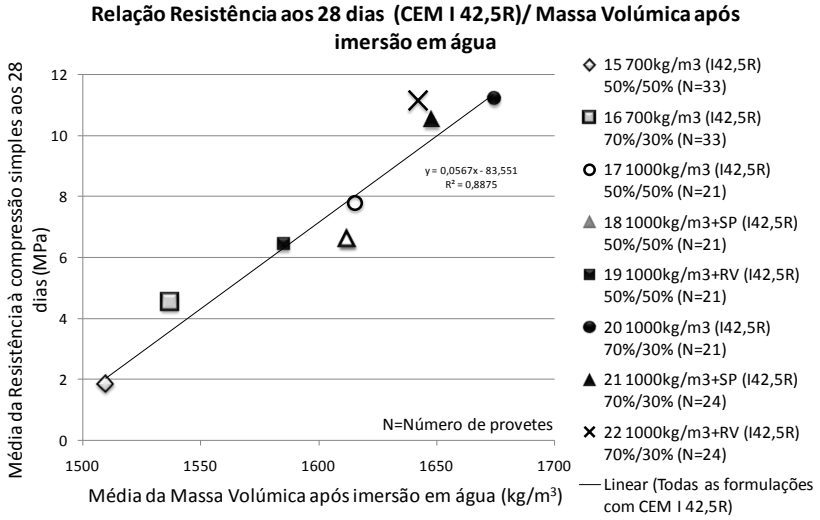
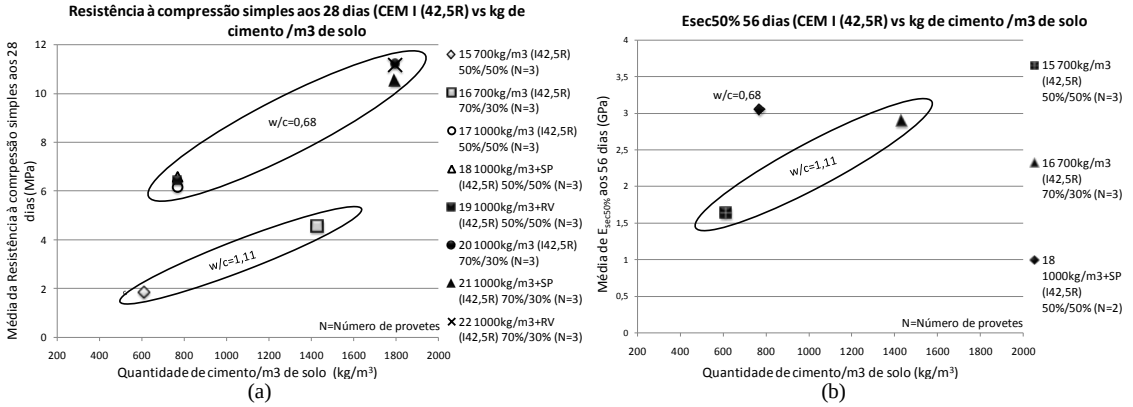


Figura 2 – Relação entre a massa volúmica após imersão em água e a resistência à compressão simples aos 28 dias de cura das formulações realizadas com cimento do tipo CEM I 42,5R.

Na Figura 3 apresenta-se a relação existente entre a resistência à compressão simples aos 28 dias e a quantidade de cimento por metro cúbico de solo utilizada (ver Quadro 1) nas formulações estudadas, bem como a relação existente entre $E_{sec50\%}$ e a quantidade de cimento por metro cúbico de solo, destacando-se ainda as formulações com iguais razões água/cimento. Da análise da figura, verifica-se a existência de uma relação linear entre as propriedades estudadas. No entanto, realça-se que nem sempre a presença de uma maior quantidade de cimento por metro cúbico de solo na mistura final resulta num maior valor da propriedade mecânica em causa. Tal comportamento é sustentado pelo facto de, nas formulações onde tal ocorrência se verifica, o aumento da quantidade de cimento por metro cúbico de solo foi acompanhado pelo aumento da razão água/cimento. Sendo assim, conclui-se que a razão água/cimento apresenta uma grande influência nas propriedades mecânicas das formulações.



(a) (b)

Figura 3 – Relação entre a (a) resistência à compressão simples aos 28 dias e (b) $E_{sec50\%}$ aos 56 dias das formulações realizadas com o cimento CEM I 42,5R e a quantidade de cimento por metro cúbico.

Na Figura 4 é apresentada a relação entre Q_{ult} e $E_{sec50\%}$, $E_{tg50\%}$ (propriedades indicadas no Quadro 3) constata-se a existência de uma relação linear entre os valores dos módulos de deformabilidade e a resistência à compressão simples, onde uma mistura com maior $E_{sec50\%}$ e $E_{tg50\%}$ apresentará uma maior resistência à compressão simples e vice-versa.

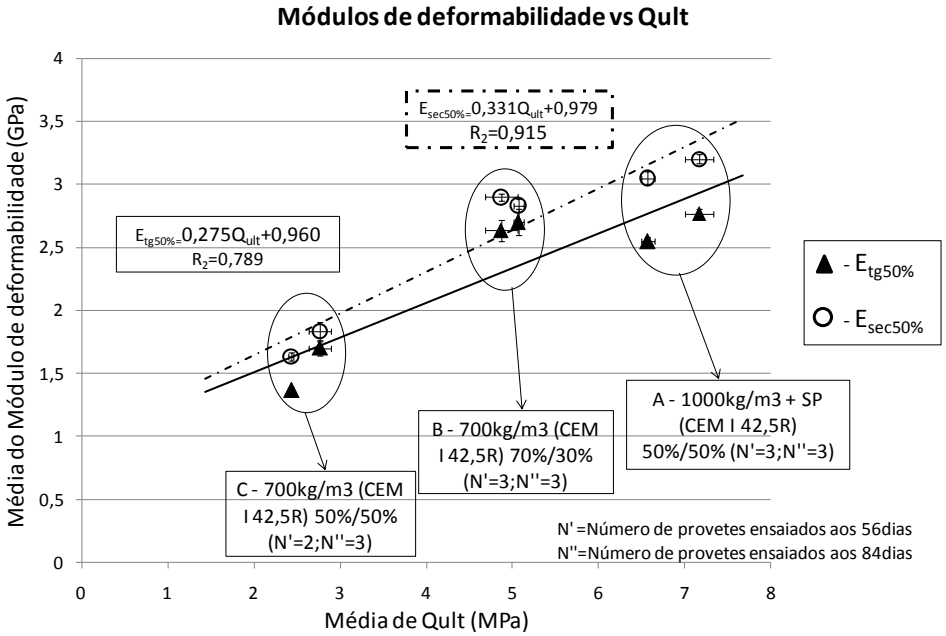


Figura 4 – Relações entre os módulos de deformabilidade e Q_{ult} das formulações estudadas para os tempos de cura de 56 e 84 dias.

3. CONCLUSÕES

Do estudo laboratorial realizado, pode-se concluir que são várias as formulações que se encontram qualificadas a cumprir os parâmetros requeridos inicialmente, excluindo o valor requerido para a massa volúmica do material tratado. Dentro destas, a que se mostra mais vantajosa, é a formulação com uma calda constituída por 1000 kg/m^3 de cimento do tipo CEM I 42,5R e com uma relação em peso entre calda de cimento e o solo utilizado de 50%/50%, com ou sem aditivos, pois é aquela que, das formulações estudadas, cumpre as características mecânicas requeridas inicialmente com a menor quantidade de cimento por metro cúbico de solo. Relativamente à massa volúmica requerida, nenhuma das formulações cumpre o especificado, tendo presente que a formulação indicada anteriormente não é aquela que apresenta a maior massa volúmica das formulações estudadas.

Verificou-se que o uso de aditivos (superplastificante e redutor de viscosidade) não apresenta qualquer influência significativa no valor da resistência à compressão simples dos provetes, tendo em conta a comparação das formulações com aditivos com as mesmas formulações sem aditivos. Não obstante, o uso de aditivos na preparação das misturas de solo-cimento permite uma melhor trabalhabilidade do material na moldagem dos provetes.

Do estudo realizado foi possível obter várias relações entre as propriedades mecânicas e entre estas e as propriedades físicas estudadas, que se julga virem a constituir uma base de dados importante para aplicações futuras em condições comparáveis.

Salienta-se que a avaliação da adequabilidade das formulações realizadas em laboratório será validada através da realização e caracterização de colunas de teste no local em estudo, cujos resultados permitirão estabelecer ajustes a futuros estudos laboratoriais.

AGRADECIMENTOS

À empresa TECNASOL-FGE são agradecidas todas as facilidades e o apoio prestado no âmbito do trabalho desenvolvido. Ao professor Rui Ferreira e aos técnicos José Gonçalves e Ricardo Magalhães é agradecida a ajuda prestada na vertente laboratorial do trabalho realizado.

REFERÊNCIAS

Falcão, João, Pinto, Alexandre e Pinto, Francisco. (2000). "Casos Práticos de Soluções de Jet Grouting Vertical." *VII Congresso Nacional de Geotecnia.* Sociedade Portuguesa de Geotecnia, 2000, Vol. II.

Giménez, Joaquín Celma. (2004). "Análisis de los factores que intervienen en la técnica del jet grouting." *Jornadas Técnicas SEMSIG-AETESS - 4ª Sessão - Mejora del Terreno Mediante Inyecciones y Jet-Grouting.* AETESS, 2004, Vol. 4.

Gomes Correia, A., Reis Ferreira, S. M. e Araújo, N. (2006). "Triaxiais de precisão para determinação das características de deformabilidade." *10º Congresso Nacional de Geotecnia.* Sociedade Portuguesa de Geotecnia, 2006, Vol. Vol. 2, pp. 317-326.

Pearlman, Seth. (1998). "Jet grouting: New directions." *Civil Engineering.* Agosto, 1998, Vol. 68.