

# MODELO ANALÍTICO DO EC2 NA PREVISÃO DAS PROPRIEDADES MECÂNICAS DE MISTURAS SOLO-CIMENTO USANDO RESULTADOS A IDADES JOVENS

## EC2 MODEL APPLIED TO THE PREDICTION OF MECHANICAL PROPERTIES OF SOIL CEMENT BASED ON TEST RESULTS AT EARLY AGES

Tinoco, Joaquim; *Universidade do Minho, Guimarães, Portugal*, [jabinoco@civil.uminho.pt](mailto:jabinoco@civil.uminho.pt)  
Gomes Correia, António; *Universidade do Minho, Guimarães, Portugal*, [agc@civil.uminho.pt](mailto:agc@civil.uminho.pt)

### RESUMO

O modelo analítico proposto pelo Eurocódigo 2 (EC2) para a previsão das propriedades mecânicas do betão ao longo do tempo tem mostrado resultados bastante satisfatórios quando adaptado a formulações laboratoriais de Jet Grouting (JG) e de Cutter Soil Mixing (CSM). No entanto, apresenta com principal limitação o facto de estar dependente da realização de ensaios experimentais aos 28 dias de cura para a quantificação das respetivas propriedades, o que limita a sua aplicabilidade em fases mais avançadas do projeto, nomeadamente para fins de controlo de qualidade. No presente artigo o modelo analítico proposto pelo EC2 para a previsão da resistência e rigidez do betão é adaptado a formulações laboratoriais de JG e CSM. Em particular, a abordagem do EC2 é adaptada no sentido de considerar resultados laboratoriais a idades jovens, nomeadamente aos 3, 7 e 14 dias de cura, em substituição dos convencionais 28 dias. Os resultados obtidos mostram que o desempenho do modelo do EC2 aumenta proporcionalmente à idade dos resultados experimentais considerados. Contudo, observou-se também apenas uma ligeira diferença entre o desempenho do modelo do EC2 considerando resultados experimentais aos 14 e aos 28 dias, o que permite fazer um balanceamento entre a precisão do modelo e o tempo/custos totais do projeto.

### ABSTRACT

The Eurocode 2 (EC2) approach for strength and stiffness prediction of concrete has been successful adapted to soil-cement laboratory formulations for Jet Grouting (JG) and Cutter Soil Mixing (CSM) technologies. However, its dependence of 28 days test result represents an important limitation. Accordingly, in the present work EC2 approach is modified in order to use laboratory reference data at early ages (e.g. 3, 7 or 14 days) and the achieved results are compared with the conventional 28 days time of cure. As expected, the achieved results show a decrease in EC2 approach performance when reference data at early ages are used. However, it is also observed just a slightly difference in EC2 approach performance when test data at 14 days or 28 days are used. This observation allows us to balance the model prediction accuracy and time consuming in the final project and construction work costs.

## 1 - INTRODUÇÃO

No âmbito dos métodos de tratamento de solos moles, as tecnologias de *Jet Grouting (JG)* (Falcão et al., 2000) e *Cutter Soil Mixing (CSM)* (Gomes Correia et al., 2013a) são duas tecnologias de referência amplamente utilizadas em todo o mundo. Ambas recorrem ao uso de um ligante (frequentemente o cimento) para realizarem a estabilização do solo. A principal diferença reside na forma como a mistura é realizada. Enquanto segundo a tecnologia de *JG* se procede à injeção de uma calda de cimento diretamente no solo a elevadas pressões e velocidades através de pequenos bicos, na tecnologia de *CSM* a mistura é realizada mecanicamente com o auxílio de pás metálicas. Além disso, na tecnologia de *CSM* o ligante pode ser aplicado quer sob a forma de calda quer em pó. No final do tratamento, em ambas as tecnologias se obtém um novo material com melhores características físicas e mecânicas, nomeadamente com uma maior resistência à compressão, um módulo de deformabilidade maior e com um menor coeficiente de permeabilidade.

Embora existam algumas diferenças relacionadas com o processo construtivo, quer a tecnologia de *JG* quer o *CSM* são caracterizadas por uma elevada complexidade no que diz respeito à previsão das propriedades mecânicas da mistura final. Esta complexidade advém essencialmente do elevado número de parâmetros envolvidos (parâmetros de tratamento, ligante utilizado, propriedades do solo, etc.) bem como à heterogeneidade dos solos. Nesse sentido, e tendo como objetivo uma melhor eficiência técnica e económica no tratamento de solos moles através das tecnologias de *JG* e *CSM*, é prática corrente a realização de um conjunto de formulações laboratoriais antes de iniciar a construção das colunas/painéis de teste/finais. Nestas formulações são usados os mesmos materiais que nos elementos finais (solo, cimento, água, etc.), no sentido de caracterizar/simular o mais fielmente possível o comportamento da mistura final a realizar *in situ*. No entanto, estas formulações podem ter um impacto significativo no

tempo e nos custos finais do projeto. Assim, no sentido de minimizar o número de formulações laboratoriais a estudar e conseqüentemente os custos finais do projeto, o uso de modelos numéricos capazes de prever com fiabilidade as propriedades mecânicas (resistência e deformabilidade) deste tipo de misturas laboratoriais ao longo do tempo (Gomes Correia et al., 2013a) será uma mais-valia.

A este respeito, a abordagem proposta pelo Eurocódigo 2 (EC2) (CEN, 2004) para a previsão da resistência à compressão uniaxial e rigidez do betão ao longo do tempo, tem mostrado elevada eficiência quando adaptada a formulações laboratoriais de *JG* e *CSM* (Tinoco and Gomes Correia, 2013). De acordo com esta abordagem, é possível prever as propriedades mecânicas de formulações laboratoriais de *JG* e *CSM* ao longo do tempo tendo por base as respetivas características aos 28 dias de cura (quantificadas experimentalmente) e o tipo de cimento utilizado na preparação das misturas. Contudo, este período de 28 dias necessário para a quantificação das propriedades de cada formulação representa uma limitação significativa durante a fase de projeto bem como nos procedimentos de verificação de controlo de qualidade, em particular a idades jovens.

Nesse sentido, e de forma a ultrapassar esta importante limitação da abordagem do EC2, no presente estudo é apresentada uma versão modificada da abordagem do EC2, onde as características de cada formulação quantificadas aos 28 dias de cura são substituídas por informação equivalente quantificada a idades mais jovens, nomeadamente aos 3, 7 e 14 dias. Os resultados obtidos corroboram a proposta apresentada, isto é, a possibilidade de utilizar dados de referência a idades mais jovens sem perda significativa da precisão do modelo, o que certamente permitirá uma melhor gestão dos custos totais do projeto.

## 2 - DADOS EXPERIMENTAIS E MODELOS

### 2.1 - Caracterização dos dados

Durante as fases de treino e teste dos modelos foram utilizados resultados de formulações laboratoriais de *JG* e *CSM*, perfazendo um total de 342 registos para o estudo da *Resistência à Compressão Uniaxial (Q)* e 188 para o estudo do *Módulo de Deformabilidade Inicial (E<sub>0</sub>)*. Estes registos contemplam formulações laboratoriais preparadas com solos recolhidos em diferentes locais (diferentes obras), utilizando diferentes razões Água/Cimento (*W/C*), dosagens de cimento (*kg/m<sup>3</sup>*) e tipo de cimento (coeficiente *s*), as quais foram ensaiadas a diferentes idades (*t*). Os Quadros 1 e 2 caracterizam as diferentes formulações utilizadas no presente trabalho para o estudo da *Q* e *E<sub>0</sub>* de misturas laboratoriais de *JG* e *CSM*, utilizando as expressões analíticas propostas pelo EC2. No caso das formulações FL11.Q e FL14.Q foram utilizadas 60 e 12 amostras respetivamente. Para as formulações FL9.Q, FL10.Q, FL12.Q e FL13.Q utilizaram-se 24 amostras e para as formulações FL25.Q a FL28.Q foram utilizadas 15 amostras. Para as restantes formulações foram utilizadas 5 amostras.

Relativamente às formulações de *CSM* (FL9-14.Q), e uma vez que o solo a ser melhorado apresentava um teor em água muito elevado, a mistura foi realizada diretamente com cimento em pó. Para as restantes formulações o valor de *W/C* indicado nos Quadros 1 e 2 corresponde à razão água cimento da calda de cimento "injetada". Uma vez que não se dispõe de dados relativos à rigidez de amostras de *CSM*, nenhuma proposta é apresentada para a previsão do *E<sub>0</sub>* deste tipo de formulações.

No que concerne aos solos utilizados na preparação das misturas laboratoriais, embora existam algumas diferenças em termos das percentagens de areia, silte, argila e matéria orgânica, todos os solos coletados nos oito locais contemplados no presente estudo são de natureza argilosa (CL, OL ou CH). De salientar contudo que este é o tipo de solo onde correntemente se aplicam as tecnologias de *JG* e *CSM*. A quantificação do *E<sub>0</sub>* e da *Q* de todas as amostras utilizadas no presente estudo foi realizada através de ensaio de compressão uniaxial com e/ou sem medição local das deformações (Gomes Correia et al., 2009).

Quadro 1 - Caracterização das Formulações Laboratoriais Utilizadas no Presente Estudo para Fins de Treino e Teste da Abordagem do EC2 – Previsão da *Q*

Formulação	Local	<i>W/C</i>	<i>s</i>	<i>Kg/m<sup>3</sup></i>	<i>t</i> (dias)	<i>Q</i> (MPa)
FL1-4.Q	A	0,83 a 1,00	0,20	800 a 900	3 a 56	2,71 a 9,53
FL5-8.Q	B	0,83 a 1,00	0,20	800 a 900	3 a 56	3,00 a 9,40
FL9-14.Q	C	NA	0,25 a 0,38	86 a 370	3 a 56	0,26 a 5,53
FL15-16.Q	D	0,91	0,20	500 a 900	3 a 56	2,20 a 6,17
FL17-20.Q	E	0,83 a 1,00	0,20	800 a 900	3 a 56	3,26 a 13,19
FL21.Q	F	1,00	0,20	950	3 a 56	2,87 a 5,71
FL22-24.Q	G	0,83 a 1,00	0,20	900 a 1000	3 a 56	1,39 a 5,01
FL25-33.Q	H	0,68 a 1,12	0,20 a 0,25	500 a 1086	3 a 56	0,76 a 12,36

NA – formulações laboratoriais de *CSM* onde a mistura é realizada com cimento em pó

Quadro 2 - Caracterização das Formulações Laboratoriais Utilizadas no Presente Estudo para Fins de Treino e Teste da Abordagem do EC2 – Previsão do  $E_0$

Formulação	Local	W/C	s	Kg/m <sup>3</sup>	t (dias)	$E_0$ (GPa)
FL1. E <sub>0</sub>	B	1,00	0,20	900	3 a 56	3,52 a 7,89
FL2-3. E <sub>0</sub>	D	0,91	0,20	500 a 900	3 a 56	1,34 a 3,42
FL4. E <sub>0</sub>	F	1,00	0,20	950	3 a 56	1,15 a 2,67
FL5. E <sub>0</sub>	G	1,00	0,20	900	3 a 56	1,68 a 4,17
FL6-8. E <sub>0</sub>	H	0,69 a 1,11	0,20	500 a 1000	3 a 56	0,25 a 2,98

Os Quadros 1 e 2 mostram também que a maioria das formulações foi preparada com elevados teores em cimento (quase todas com um teor em cimento superior a 500 kg/m<sup>3</sup>) e testadas entre os 3 e 56 dias de idade cura. As únicas exceções são as formulações relativas a projetos de *CSM*, as quais apresentam teores em cimento mais baixos (entre o 86 kg/m<sup>3</sup> e os 370 kg/m<sup>3</sup>), tendo sido apenas ensaiadas até aos 28 dias de cura.

## 2.2 - Abordagem do EC2

De acordo com a abordagem proposta pelo EC2 (CEN, 204) a previsão da resistência e deformabilidade do betão ao longo do tempo pode ser realizada de acordo com a Eqs. (1) e (2) respetivamente.

$$f_{cm}(t) = e^{\left(s \cdot \left[1 - \left(\frac{28}{t}\right)^a\right]\right)} \cdot f_{cm} \quad [1]$$

$$E_{cm}(t) = \left( e^{\left(s \cdot \left[1 - \left(\frac{28}{t}\right)^b\right]\right)} \right)^c \cdot E_{cm} \quad [2]$$

Nas equações acima,  $t$  é a idade da mistura,  $s$  é um coeficiente relacionado com o tipo de cimento, o qual se encontra definido no EC2 (CEN, 2004),  $a$ ,  $b$  e  $c$  são os coeficiente a serem ajustados usando do resultados de misturas laboratoriais de solo-cimento,  $f_{cm}$  e  $E_{cm}$  representam respetivamente a resistência e deformabilidade de cada formulação aos 28 dias de cura, e  $f_{cm}(t)$  e  $E_{cm}(t)$  são respetivamente a resistência e deformabilidade da mistura ao fim de  $t$  dias.

No sentido de adaptar as Eqs. (1) e (2) a formulações laboratoriais de *JG* e *CSM* e avaliar o respetivo desempenho quando aplicadas a novos dados, ambas as base de dados (estudo da resistência e deformabilidade) foram subdivididas em dois subconjuntos. Um constituído com 2/3 dos registos, para a fase de treino dos modelos propostos, isto é, para ajustar os coeficientes  $a$ ,  $b$  e  $c$  das Eqs. (1) e (2), e um segundo conjunto constituído com os restantes registos para testar o desempenho do modelo.

## 2.3 - Métricas de desempenho

Na avaliação do desempenho dos modelos foram calculadas três métricas (Hastie et al., 2009): Erro Médio Absoluto (MAD), Raiz Quadrada do Erro Quadrado (RMSE), e o coeficiente de determinação ( $R^2$ ), as quais podem ser quantificadas de acordo com as Eqs. (3), (4) e (5).

$$MAD = \frac{\sum_{i=1}^N |y - \hat{y}|}{N} \quad [3]$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (y - \hat{y})^2}{N}} \quad [4]$$

$$R^2 = \left( \frac{\sum_{i=1}^N (y - \bar{y}) \times (\hat{y} - \bar{\hat{y}})}{\sqrt{\sum_{i=1}^N (y - \bar{y})^2 \times \sum_{i=1}^N (\hat{y} - \bar{\hat{y}})^2}} \right)^2 \quad [5]$$

Enquanto valores reduzidos de MAD e RMSE são indicador de um modelo com elevado desempenho, o  $R^2$  deverá aproximar-se tanto quanto possível do valor unitário. A principal diferença entre as métricas MAD 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 MAD, 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 perspectiva diferente mas complementar sobre o desempenho do modelo.

### 3 - ANÁLISE E DISCUÇÃO DOS RESULTADOS

Tal como sublinhado na Secção 1 - Introdução, o presente estudo tem dois principais objetivos. Por um lado, mostrar a aplicabilidade da abordagem do EC2 a formulações laboratoriais de *JG* e *CSM*. Por outro lado, avaliar a possibilidade de usar dados de referência a idades mais jovens em substituição dos convencionais 28 dias. Nesse sentido, o coeficiente *a* da Eq. (1) foi ajustado com dados da *Q* de formulações laboratoriais de *JG* e *CSM*, e os coeficientes *b*, *c* da Eq. (2) com dados do *E<sub>0</sub>* de formulações laboratoriais de *JG*. Em cada uma destas três situações, os parâmetros *f<sub>cm</sub>* e *E<sub>cm</sub>*, os quais representam na abordagem inicial do EC2 a resistência e deformabilidade de cada formulação aos 28 dias de cura (designados no presente artigo por dados de referência), foram iterativamente substituídos pela equivalente informação aos 3, 7, 14 e 28 dias de cura. O Quadro 3 resume os valores otimizados dos coeficientes *a*, *b* e *c* para cada uma das situações acima descritas.

Quadro 3 – Valor Otimizado dos Coeficientes *a*, *b* e *c* das Eqs. (1) e (2)

Modelo		<i>a</i>	<i>b</i>	<i>c</i>
3 dias	<i>Q</i> – <i>JG</i>	0,04	-	-
	<i>Q</i> – <i>CSM</i>	-28,47	-	-
	<i>E<sub>0</sub></i> – <i>JG</i>	-	2,42E <sup>-4</sup>	1,14 E <sup>2</sup>
7 dias	<i>Q</i> – <i>JG</i>	0,37	-	-
	<i>Q</i> – <i>CSM</i>	0,26	-	-
	<i>E<sub>0</sub></i> – <i>JG</i>	-	2,24 E <sup>-4</sup>	8,62 E <sup>2</sup>
14 dias	<i>Q</i> – <i>JG</i>	0,50	-	-
	<i>Q</i> – <i>CSM</i>	0,42	-	-
	<i>E<sub>0</sub></i> – <i>JG</i>	-	4,30 E <sup>-4</sup>	1,98 E <sup>3</sup>
28 dias	<i>Q</i> – <i>JG</i>	0,67	-	-
	<i>Q</i> – <i>CSM</i>	0,56	-	-
	<i>E<sub>0</sub></i> – <i>JG</i>	-	1,61 E <sup>-3</sup>	6,91 E <sup>2</sup>

A Figura 1 ilustra a relação entre os valores experimentais e os previstos pela abordagem do EC2 adaptada/modificada a dados de *JG* utilizando dados de referência aos 3 dias de cura. Na Figura 2 é apresentada a relação equivalente considerando dados de referência aos 14 dias de cura.

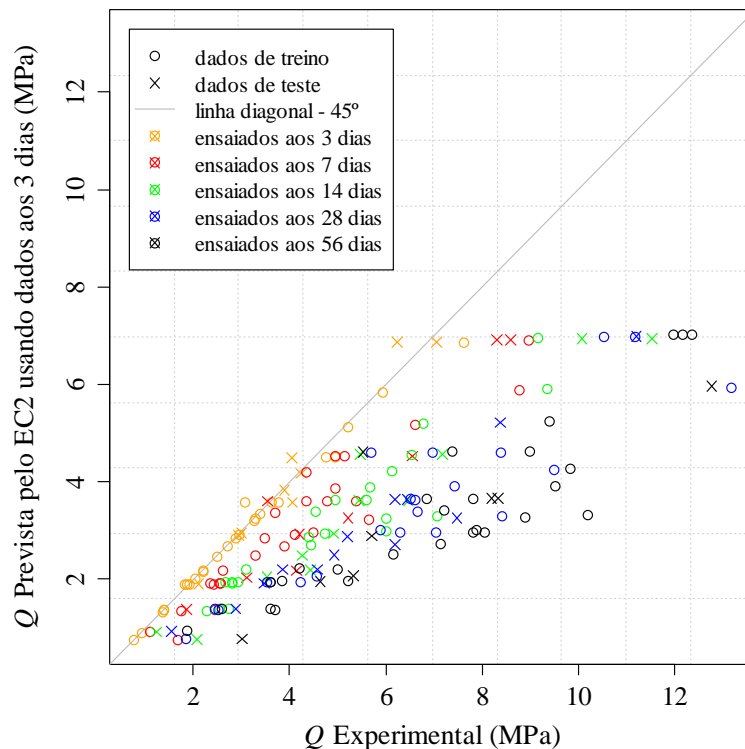


Figura 1 – Relação entre os Valores Experimentais da *Q* e os Previstos pela Abordagem Modificada do EC2 Utilizando Dados de Referência aos 3 Dias de Formulações Laboratoriais de *JG*

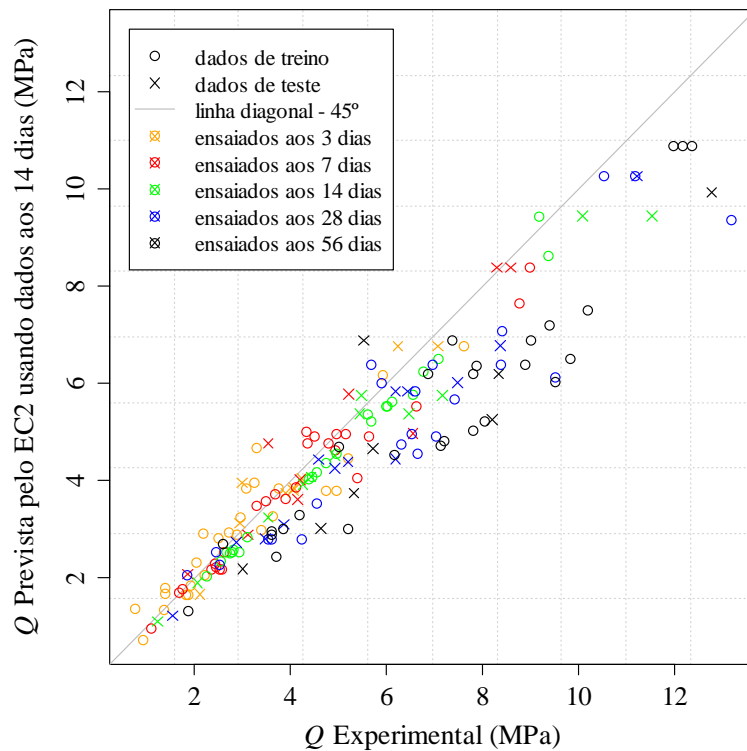


Figura 2 – Relação entre os Valores Experimentais da  $Q$  e os Previstos pela Abordagem Modificada do EC2 Utilizando Dados de Referência aos 14 Dias de Formulações Laboratoriais de  $JG$

Indo de encontro ao que seria espectável, o uso de dados de referência a idades muito jovens (i.e., 3 dias de cura) não permite estimar com fiabilidade a  $Q$  de formulações laboratoriais de  $JG$  ao longo do tempo. No entanto, o uso de dados de referência a idades mais avançadas conduz a um aumento significativo do desempenho da abordagem do EC2. De facto, o uso de dados de referência aos 28 dias de cura permite obter um desempenho muito bom ( $R^2 > 0,9$ ), tal como ilustrado na Figura 3, a qual ilustra a relação entre os valores experimentais e os previstos pela abordagem do EC2 adaptada/modificada a dados de  $JG$  utilizando dados de referência aos 28 dias de cura.

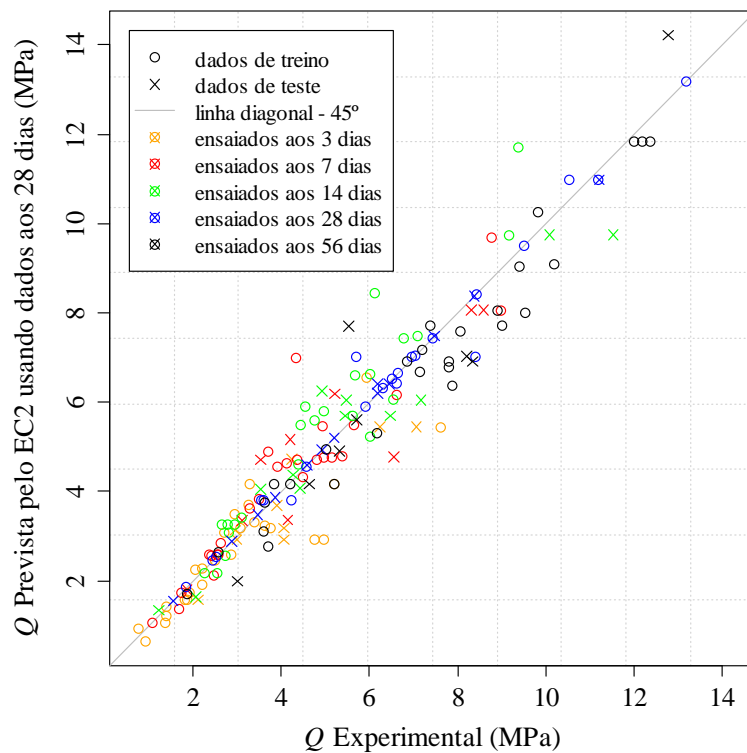


Figura 3 – Relação entre os Valores Experimentais da  $Q$  e os Previstos pela Abordagem Modificada do EC2 Utilizando Dados de Referência aos 28 Dias de Formulações Laboratoriais de  $JG$

Na Figura 4 é comparado, tendo por base o valor de  $R^2$ , o desempenho da abordagem modificada do EC2 na previsão da  $Q$  de formulações laboratoriais de JG, utilizando dados de referência aos 3, 7, 14 e 28 dias de cura. No Quadro 4 são apresentados os valores das métricas MAD, RMSE e  $R^2$  para cada uma das situações acima descritas, isto é, utilizando dados de referência a diferentes idades. Da sua análise observa-se uma clara influência da idade dos dados de referência no desempenho da expressão analítica proposta pelo EC2 para a previsão da resistência. Isto é, quanto menor for a idade das amostras ensaiadas para quantificar os parâmetros  $f_{cm}$  e  $E_{cm}$ , pior o desempenho do modelo. De salientar contudo a existência de apenas uma pequena diferença entre o desempenho da abordagem modificada do EC2 utilizando dados de referência aos 14 e 28 dias de cura. Esta observação mostra que em determinadas situações poderá ser vantajoso utilizar dados de referência aos 14 dias de cura em vez de esperar o dobro do tempo e beneficiar de uma ligeira melhoria na precisão da modelo.

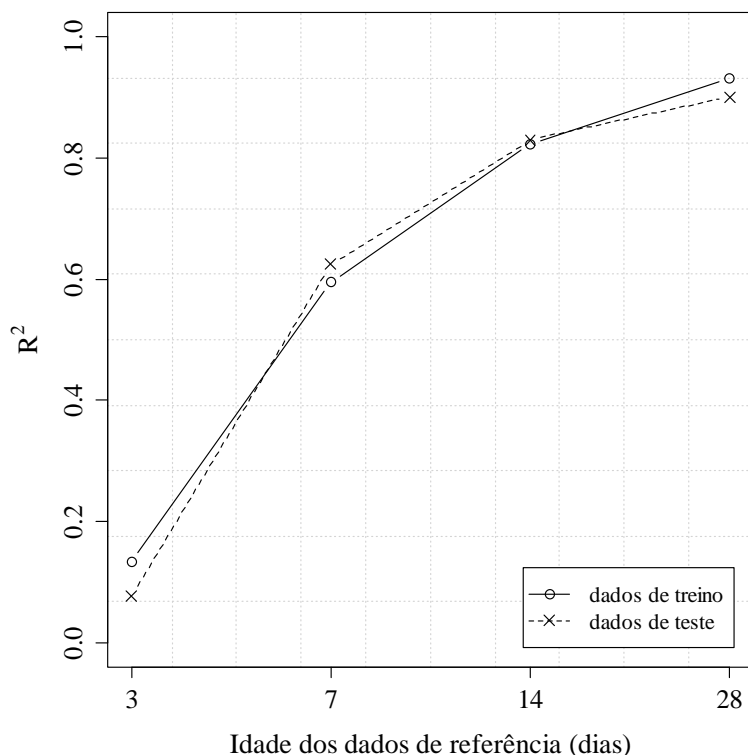


Figura 4 – Comparação do Desempenho da Abordagem Modificada do EC2 na Previsão da  $Q$  de Formulações Laboratoriais de JG, em Função da Idade dos Dados de Referência Utilizados

Quadro 4 – Desempenho da abordagem modificada do EC2, utilizando as métricas MAD, RMSE e  $R^2$

Modelo	MAD		RMSE		$R^2$		
	treino	teste	treino	teste	treino	Teste	
3 dias	$Q - JG$	1,93	1,96	2,60	2,45	0,13	0,08
	$Q - CSM$	0,39	0,48	0,63	0,70	0,73	0,71
	$E_0 - JG$	0,70	0,79	0,98	1,05	0,49	0,45
7 dias	$Q - JG$	1,30	1,23	1,78	1,56	0,60	0,62
	$Q - CSM$	0,29	0,32	0,41	0,45	0,89	0,88
	$E_0 - JG$	0,56	0,58	0,82	0,83	0,61	0,61
14 dias	$Q - JG$	0,81	0,78	1,17	1,04	0,83	0,83
	$Q - CSM$	0,16	0,18	0,25	0,26	0,96	0,96
	$E_0 - JG$	0,36	0,39	0,47	0,48	0,87	0,87
28 dias	$Q - JG$	0,50	0,57	0,73	0,80	0,93	0,90
	$Q - CSM$	0,10	0,11	0,14	0,15	0,99	0,99
	$E_0 - JG$	0,29	0,26	0,38	0,35	0,92	0,93

A Figura 5 ilustra o desempenho da abordagem modificada do EC2 quando aplicada na previsão da  $Q$  de formulações laboratoriais de CSM, considerando dados de referência aos 28 dias de cura. Também neste tipo de misturas uma excelente capacidade de previsão foi obtida ( $R^2=0,99$ ). Embora, o melhor desempenho seja conseguido com a utilização de dados de referência aos 28 dias de cura, deve-se contudo salientar que a utilização de dados de referência a idades significativamente mais jovens, nomeadamente aos 7 dias de cura, também permite obter um desempenho muito interessante, tal como ilustrado na Figura 6 e detalhado no Quadro 4. De facto, mesmo com a utilização de dados de referência

aos 3 dias de cura um  $R^2$  superior a 0,7 foi obtido, o que representa um desempenho muito interessante tendo em conta a idade das amostras consideradas. Além disso, e à semelhança da previsão da  $Q$  de formulações laboratoriais de  $JG$ , a abordagem modificada do EC2 apresenta um desempenho superior quando alimentado com dados de referência a idades mais avançadas. No entanto, uma vez mais observa-se apenas uma ligeira diferença entre o desempenho da abordagem do EC2 quando alimentada com dados de referência aos 14 ou 28 dias de cura.

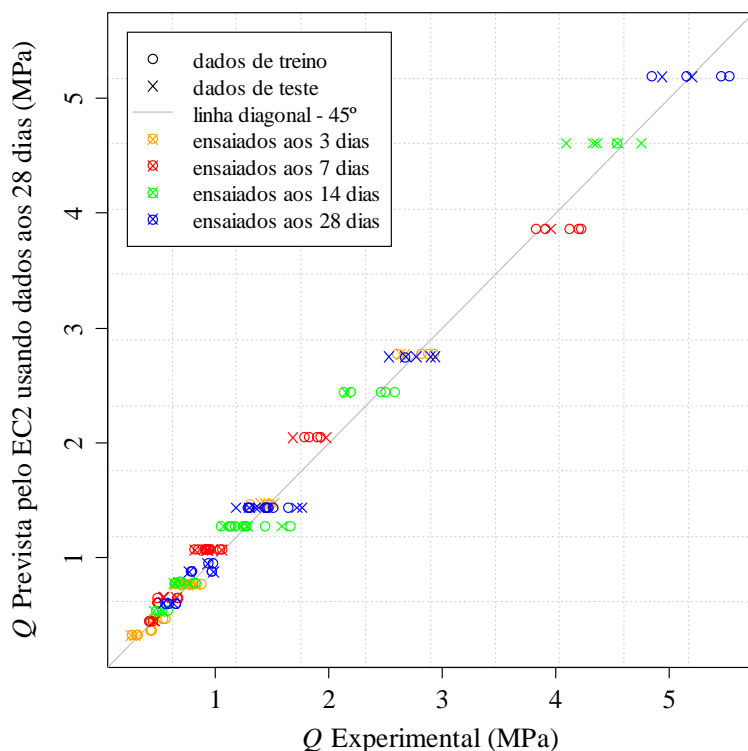


Figura 5 – Relação entre os Valores Experimentais da  $Q$  e os Previstos pela Abordagem Modificada do EC2 Utilizando Dados de Referência aos 28 Dias de Formulações Laboratoriais de  $CSM$

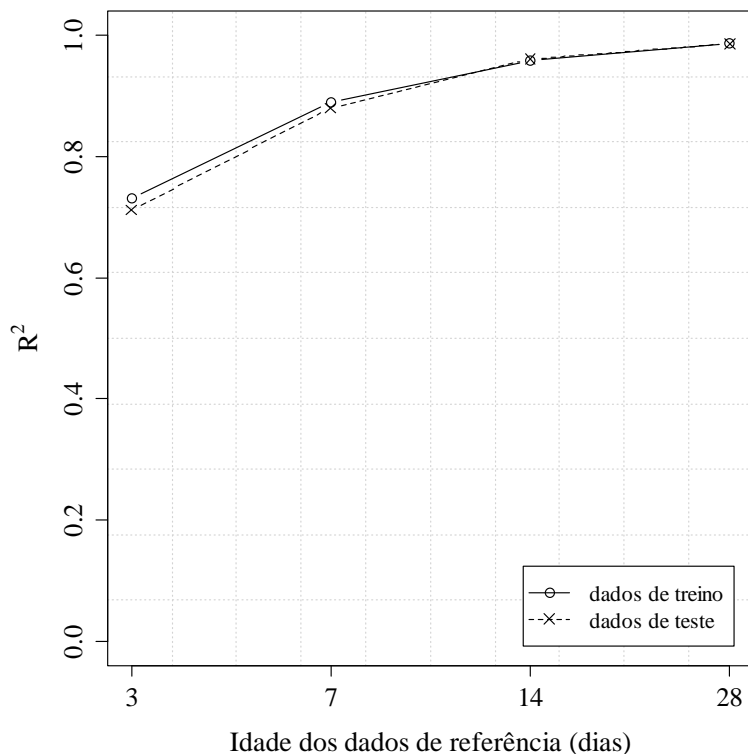


Figura 6 – Comparação do Desempenho da Abordagem Modificada do EC2 na Previsão da  $Q$  de Formulações Laboratoriais de  $CSM$ , em Função da Idade dos Dados de Referência Utilizados

Tendo por base os resultados acima apresentados observa-se que a abordagem modificada do EC2 tem um melhor desempenho na previsão da  $Q$  de formulações laboratoriais de  $JG$  do que de  $CSM$ . Comparando as formulações de  $JG$  e  $CSM$  utilizadas no presente estudo, verifica-se que a principal diferença prende-se essencialmente com a forma como as misturas foram realizadas. Enquanto nas formulações de  $JG$  o solo foi misturado com uma calda de cimento, nas formulações de  $CSM$  o cimento foi misturado diretamente com o solo em forma de pó. Assim, tendo por base esta observação, podemos concluir que a abordagem do EC2 prevê mais eficazmente a  $Q$  de misturas laboratoriais de solo-cimento quando o cimento é adicionado sob a forma de pó do que sob a forma de calda.

Analisando agora os resultados da adaptação/modificação da abordagem do EC2 à previsão do  $E_0$  de formulações laboratoriais de  $JG$ , podemos observar que o desempenho obtido é muito semelhante àquele conseguido no estudo da  $Q$ . Tal como ilustrado na Figura 7, a abordagem modificada do EC2 é capaz de prever com elevada precisão o  $E_0$  de formulações laboratoriais de  $JG$  ao longo do tempo. Em particular, o uso de dados de referência a idades avançadas, nomeadamente aos 28 dias de cura permite obter um muito bom desempenho caracterizado por um  $R^2$  superior a 0,92.

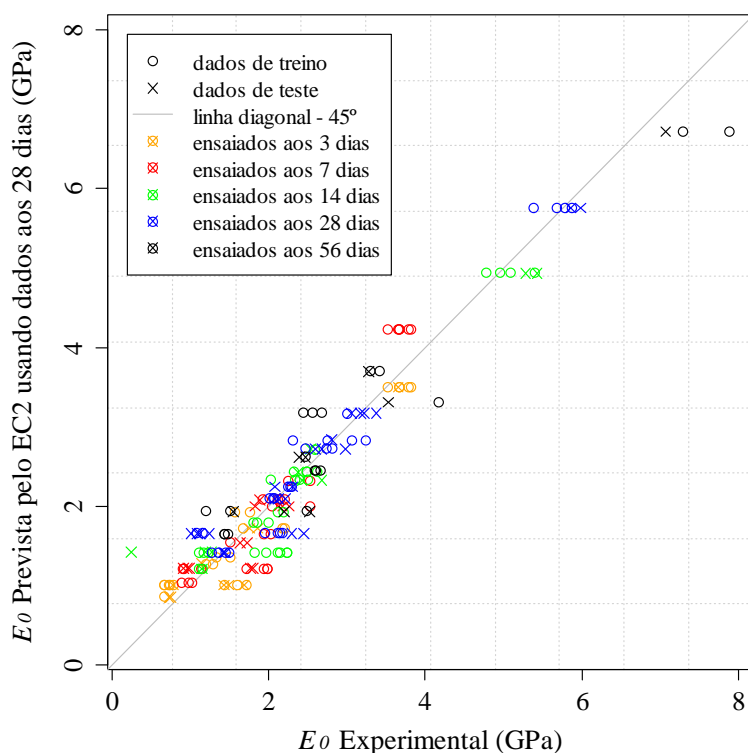


Figura 7 – Relação entre os Valores Experimentais do  $E_0$  e os Previstos pela Abordagem Modificada do EC2 Utilizando Dados de Referência aos 28 dias de Formulações Laboratoriais de  $JG$

Da análise e interpretação da Figura 7, a qual compara o desempenho da abordagem do EC2 na previsão do  $E_0$  de formulações laboratoriais de  $JG$  utilizando dados de referência a diferentes idades, duas observações merecem uma particular atenção. Por um lado, regista-se uma vez mais uma clara influência da idade dos dados de referência no desempenho da abordagem do EC2 na previsão do  $E_0$  de formulações laboratoriais de  $JG$ . Ou seja, o uso de dados de referência a idades mais avançadas permite obter melhores resultados. Por lado, observa-se também que o desempenho da abordagem do EC2 na previsão do  $E_0$  se mantém sensivelmente constante para dados de referência acima dos 14 dias de cura. Isto significa que em determinadas condições poderá ser vantajoso, nomeadamente a nível económico, o uso de dados de referência aos 14 dias de cura em detrimento da maior precisão conseguida com a utilização de dados de referência aos 28 dias.

Uma última observação transversal a todas as situações contempladas no presente artigo, isto é, a aplicação da abordagem do EC2 na previsão da  $Q$  e  $E_0$  de formulações laboratoriais de  $JG$  e  $CSM$ , prende-se com o facto de a abordagem do EC2 apresentar uma melhor capacidade de interpolação do que propriamente de extrapolação. Por outras palavras, isto significa que conhecendo as propriedades de uma determinada formulação a idades avançadas é possível prever com bastante fiabilidade as respetivas propriedades a idades mais jovens, não se verificando o mesmo na situação inversa.



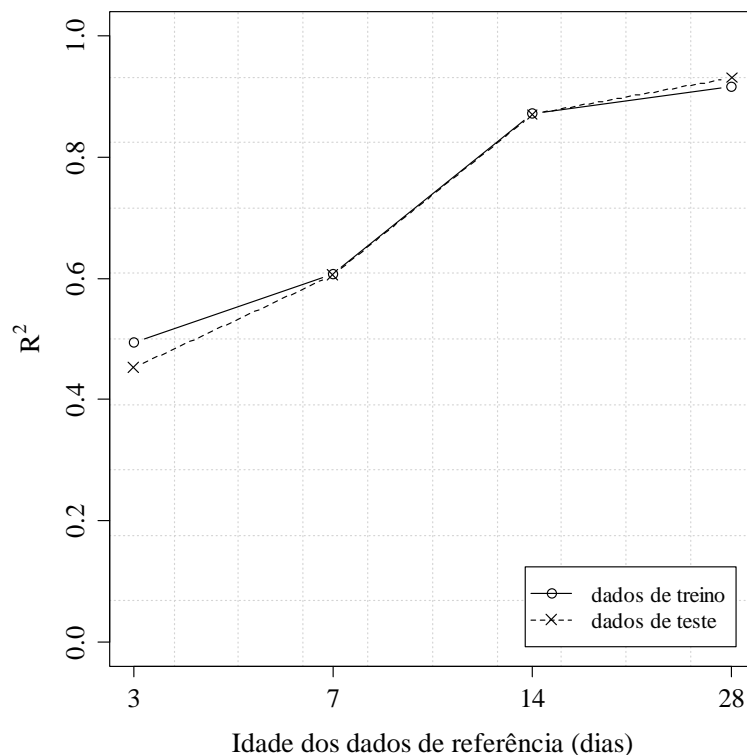


Figura 8 – Comparação do Desempenho da Abordagem Modificada do EC2 na Previsão do  $E_0$  de Formulações Laboratoriais de *JG*, em Função da Idade dos Dados de Referência Utilizados

#### 4 - CONCLUSÕES

No presente trabalho, o modelo analítico proposto pelo Eurocódigo 2 (EC2) para a previsão da resistência e deformabilidade do betão foi adaptado/modificado a formulações laboratoriais de *Jet Grouting (JG)* e *Cutter Soil Mixing (CSM)*. Das experiências realizadas há a salientar duas principais conclusões. Por um lado foi posto em evidência que a abordagem do EC2 pode ser adaptada com sucesso na previsão da *Resistência à Compressão Uniaxial ( $Q$ )* e do *Módulo de Deformabilidade Inicial ( $E_0$ )* de formulações laboratoriais de *JG* e *CSM*, tendo-se obtido um  $R^2$  superior a 0,90.

Por outro lado concluiu-se que o uso de dados de referência coletados em amostras ensaiadas a idades jovens (e.g. 3 ou 7 dias de cura) em substituição dos convencionais 28 dias conduz a uma diminuição significativa do desempenho da abordagem do EC2. Contudo, observou-se também que o desempenho da abordagem do EC2 quando alimentada com dados de referência coletados aos 14 ou 28 dias de cura é muito semelhante. Esta observação permite-nos concluir que em determinadas condições será possível fazer um balanceamento entre a precisão do modelo e o tempo necessário para a recolha de informação necessária para alimentar o modelo, e consequentemente otimizar os custos finais do projeto.

#### AGRADECIMENTOS

Os autores gostariam de agradecer à Fundação Para a Ciência e a Tecnologia (FCT) pelo apoio financeiro no âmbito do projeto estratégico PEst-OE/EC1/UI4047/2011. Agradecesse também à empresa Tecnasol-FGE e em particular ao Eng<sup>o</sup>. Tiago Valente e Eng<sup>o</sup>. Christophe Ferreira pela disponibilização dos dados utilizados no presente estudo.

#### REFERÊNCIAS

- CEN (2004). *Eurocode 2, Design of Concrete Structures - Part 1-1: General Rules and Rules for Buildings*. European Committee for Standardization, Brussels.
- Falcão, J., Pinto, A. e Pinto, F. (2000). Case histories of ground improvement solutions using jetgrouting. *Geotechnical News*, Tecnasol FGE: Fundações e Geotecnia S.A.
- Gomes Correia, A., Valente, T., Tinoco, J., Falcão, J., Barata, J., Cebola, D. e Coelho, S. (2009). Evaluation of mechanical properties of jet grouting columns using different test methods. *17th International Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering (17th ICSMGE)*. IOS Press. Alexandria, Egypt, pp.2169-2171.

- Gomes Correia, A., Cortez, P., Tinoco, J. e Marques, R. (2013a). Artificial Intelligence Applications in Transportation Geotechnics. *Geotechnical and Geological Engineering*, Springer, Vol. 31(3): 861-879.
- Gomes Correia, A., Tinoco, J. e Pinto, A. (2013b). An anchored retaining wall in CSM. *18th international conference on soil mechanics and geotechnical engineering*. Paris, France, pp.1-4.
- Hastie, T., Tibshirani, R. e Friedman, J. (2009). *The Elements of Statistical Learning: Data Mining, Inference, and Prediction*. Springer-Verlag, New York, second edition.
- Tinoco, J. e Gomes Correia, A. (2013). Prediction of Soil-cement Mechanical Properties using EC2 Approach. *Advanced Materials Research*, Trans Tech Publications, Vol. 779-780: 286-289.