

COMPORTAMENTO MECÂNICO E DURABILIDADE DE ARGAMASSAS AUTO-COMPACTÁVEIS PRODUZIDAS EM MISTURAS TERNÁRIAS DE NANO SÍLICA (SiO_2) E NANO TITÂNIO (TiO_2)



S. V. RAO
Assistente
NIT
Warangal; Índia
svrao_civil@yahoo.co.in



J. de BRITO
Prof. Catedrático
IST
Lisboa; Portugal
jb@civil.ist.utl.pt



P. R. da SILVA
Assistente
ISEL
Lisboa; Portugal
silvamp@ec.isel.pt

RESUMO

Actualmente, na indústria da construção, a reparação e reabilitação de estruturas tem tido um papel de destaque. As argamassas desempenham um papel vital nestes trabalhos. Como tal, a fluidez da argamassa pode apresentar-se como uma vantagem em situações de inacessibilidade das zonas a reparar como no caso de elementos densamente armados, fendas estreitas ou fissuras. Devido às suas inúmeras vantagens, as argamassas do tipo auto-compactável são, actualmente, as mais utilizadas para fins de reparação e reabilitação, especialmente em estruturas de betão armado.

O cimento, bem como os restantes constituintes destas argamassas, devem ser cuidadosamente seleccionados, a fim de se obter uma composição adequada com uma mistura granular o mais compacta possível, com um bom desempenho, tanto no estado fresco (efeito auto-compactável) como no endurecido (comportamento mecânico e de durabilidade). Por conseguinte, no presente trabalho, foi estudada a possibilidade incorporação de nano-partículas em argamassas auto-compactáveis. Os nano materiais são muito reactivos devido essencialmente à sua elevada superfície específica e apresentam um elevado potencial na melhoria das propriedades destas argamassas, tanto ao nível do comportamento mecânico como da durabilidade.

No presente trabalho, foram utilizados dois nano materiais, nano sílica (SiO_2) em estado coloidal e nano titânio (TiO_2) em estado amorfo, em dois tipos de argamassas auto-compactáveis (mistura ligante: areia de 1:1 e 1:2). As misturas de argamassas auto-compactáveis apresentam a mesma razão W/C e 30% de substituição de cimento por cinzas volantes. Com as referidas misturas, foi estudada a influência dos nano materiais nano sílica SiO_2 e nano titânio TiO_2 nas propriedades das argamassas auto-compactáveis no estado fresco e no estado endurecido.

1. INTRODUÇÃO

As cinzas volantes (CV) são um dos resíduos industriais mais utilizados na indústria do cimento e do betão como adição e apresentam inúmeras vantagens, tais como a redução no consumo de cimento, o aumento da fluidez do betão, um potencial aumento tanto da durabilidade do betão como da sua resistência mecânica em idades mais avançadas. No entanto, o retardamento na evolução da resistência mecânica observado nas primeiras idades pode, em alguns casos, representar uma desvantagem significativa. Embora o referido retardamento possa até ser favorável para algumas aplicações, tais como betonagens de peças de grande volume [1], na maioria dos casos este efeito é indesejável. De modo a compensar o referido efeito, muitos métodos têm sido explorados de modo a acelerar o processo de hidratação nas idades

iniciais em misturas binárias de cimento e cinzas volantes, incluindo processos de moagem dos componentes [2], activação química das cinzas [3], tratamentos hidrotérmicos [4, 5], entre outros.

Nos últimos anos, a SiO₂ foi introduzida no estudo de argamassas e/ou betões e vários estudos têm demonstrado que, mesmo em dosagens reduzidas, pode melhorar as propriedades mecânicas destas misturas cimentícias [6]. De acordo com o trabalho de Nazari e Riahi [1], foi possível um aumento da resistência à compressão de 70% com a adição de 4% de nano-sílica (em massa de cimento). Do mesmo modo, Shih et al. [7] demonstraram que uma adição de 0,6% de nano-sílica coloidal pode aumentar a resistência à compressão de pastas de cimento em 43,8%. Já Li et al. [8] referem que, com a adição de 3 e 5% de nano-sílica em argamassas de base cimentícia, a resistência à compressão aumenta em 13,8 e 17,5% aos 28 dias, respectivamente. Nesse sentido, Zhang et al. [2] e Li [9] referem melhorias significativas nas propriedades mecânicas de misturas cimentícias com elevadas substituição de cimento por adições pozolânicas tais como cinzas volantes e/ou escórias de alto-forno, com a utilização de nano sílica.

Existem, no entanto, dois problemas importantes a serem considerados com relação ao uso de SiO₂ em pó. O primeiro refere-se à dispersão destas partículas na fase de amassadura das argamassas ou betões e o segundo à perda de trabalhabilidade devido essencialmente à elevada superfície específica das partículas. É de salientar que, nos trabalhos referidos nos parágrafos anteriores, foram aplicadas técnicas de dispersão mecânica ou por ultra-sons e em alguns casos os autores referem a aplicação de sistemas de tratamento da superfície das partículas. Uma dispersão inadequada poderá entre outros efeitos provocar uma evolução menos favorável da resistência à compressão [8].

Ao considerar a utilização em mistura binárias dos dois constituintes apresentados (CV e SiO₂), os benefícios de cada um individualmente podem seguramente contribuir para superar os problemas do outro: a SiO₂ reactiva pode melhorar as propriedades mecânicas nas primeiras idades (problema referido para as CV), enquanto as CV podem melhorar a trabalhabilidade (problema referido para a SiO₂). Relativamente ao problema da dispersão das partículas de SiO₂ em pó, é possível substituir esta por misturas de SiO₂ coloidal à base de água.

Com a evolução do estudo dos nano materiais aplicados aos matérias de construção, o TiO₂ tem sido amplamente estudado em diversos campos incluindo a eliminação de águas residuais e gases de exaustão e a melhoria das propriedades mecânicas e de durabilidade do betão [4]. Nazari e Riahi [1] estudaram a influência de diversos nano materiais no comportamento mecânico e na microestrutura de betão. Os autores referem o aumento da densidade do betão com uma melhoria significativa tanto ao nível do comportamento mecânico como da sua durabilidade com o aumento do conteúdo de TiO₂ na mistura. Os autores justificam as referidas melhorias de desempenho com o acelerar na formação do gel C-S-H devido ao maior volume de Ca(OH)₂ em fase cristalina especialmente nas primeiras idades. Os resultados apresentados por Li e Zhang [2, 9] demonstram que a utilização de SiO₂ e de TiO₂ provoca uma melhoria significativa no refinamento da estrutura porosa do betão aumentando a sua resistência à penetração de cloretos. Fujishima [8] estudou igualmente a influência da utilização de nano partículas na resistência mecânica de betão e obteve resultados semelhantes aos observados por Li e Zhang [2, 9]. São ainda de realçar as excelentes propriedades foto-catalíticas do TiO₂ que, ao ser incorporado na produção de betão, poderá contribuir para o processo de decomposição dos gases poluentes presentes na atmosfera em simultâneo com a melhoria e optimização do desempenho desse mesmo betão.

No presente trabalho, foram estudados os efeitos da utilização de SiO₂ na forma coloidal e TiO₂ em pó no comportamento tanto no estado fresco como endurecido de argamassas auto-compactáveis produzidas em misturas ternárias de cimento, CV e os referidos nano materiais.

2. MATERIAIS E PROCEDIMENTOS DE ENSAIO

2.1 Materiais utilizados

Os materiais utilizados neste trabalho foram seleccionados de acordo com a sua disponibilidade em Portugal e tendo em consideração as argamassas auto-compactáveis em análise. Desse modo, foram utilizados os seguintes materiais:

- um tipo de cimento de acordo com a NP EN 197-1: 2001 / A3, 2008 (CPN tipo I-42,5 R, com massa volúmica de 3,14 kg/dm³);
- uma adição: CV de acordo com as NP EN 450-1: 2005 / A1, 2008 e NP EN 450-2: 2006, com massa volúmica de 2,30 kg/dm³;
- duas areias siliciosas de acordo com a NP EN 12620: 2002 / A1, 2010, uma areia grossa (0/4) com massa volúmica de 2,55 kg/dm³, módulo de finura de 3,70 e absorção de água de 1,10% e uma areia fina (0/1) com massa volúmica

- de 2,58 kg/dm³, módulo de finura de 2,03 e absorção de água de 0,70%;
- um superplastificante (S_p) de elevado desempenho, forte redutor de água, de acordo com as NP EN 934-1: 2008 e NP EN 934-2: 2009 (uma combinação de policarboxilatos modificados, em solução aquosa com massa volúmica de 1,07 kg/dm³);
- água da rede pública de acordo com a NP EN 1008: 2003;
- nano sílica (SiO₂) em estado coloidal, com uma superfície específica 260 m²/g, uma dimensão média das partículas de 20 nm e um pH entre 9,4 e 10,4;
- nano titânio (TiO₂) em estado amorfo, com uma superfície específica de 50 m²/g, uma dimensão média das partículas de 20 nm e um pH entre 3,5 e 4,5.

Tabela 1 - Características químicas do cimento e das cinzas volantes

Análise química (%)		CEM I 42,5 R	CV
Óxido de alumínio	Al ₂ O ₃	5,24	24,7
Óxido de cálcio	CaO	62,71	2,63
Cloretos	Cl ⁻	0,01	< 0,01
Óxido de ferro	Fe ₂ O ₃	3,17	5,4
Óxido de potássio	K ₂ O	---	1,112
Óxido de magnésio	MgO	2,23	1,01
Óxido de sódio	Na ₂ O	---	0,89
Óxido de silício	SiO ₂	19,59	54,7
Sulfatos	SO ₃	3,13	1,38
Resíduo insolúvel	RI	1,37	---
Perda ao fogo	PF	2,94	5,1

Tabela 2 - Características físicas do cimento e das cinzas volantes

Análise física		CEM I 42,5 R	CV
Massa volúmica	[kg/m ³]	3140	2300
Superfície específica de Blaine	[cm ² /g]	3470	3210
Resíduo de peneiração (45 mm)	[%]	9,8	< 15
Água da pasta normal	[%]	29,2	---
Início de presa	[min]	150	---
Fim de presa	[min]	200	---
Expansibilidade	[mm]	1,0	---

2.2 Quantidades de amassadura

No presente trabalho, foram seleccionados dois tipos de argamassas auto-compactáveis (mistura ligante: areia de 1:1 e 1:2). Aos dois tipos de argamassas referidas (quantidades de amassadura apresentadas na Tabela 4) foi adicionado TiO₂ no estado amorfo em percentagem de cimento de 0,50, 0,75 e 1,00 %. De modo análogo, foram produzidas amassaduras auto-compactáveis com a adição de SiO₂ em estado coloidal (30% de sílica) em percentagem de cimento de 0,75, 1,5 e 3,00%. No caso da adição de SiO₂, foi necessário reduzir a quantidade de água da amassadura devido ao estado coloidal das mesmas. Todas as misturas de argamassas auto-compactáveis apresentam a mesma razão W/C e 30% de substituição de cimento por CV.

Tabela 4 - Quantidades de amassadura

Mistura	Cimento (kg/m ³)	CV (kg/m ³)	Areia 0/1 (kg/m ³)	Areia 0/4 (kg/m ³)	Água (l/m ³)	W/C	S _p (% massa de cimento)
1:1	665	286	485	485	286	0,43	0,75
1:2	490	210	695	695	211	0,43	1,50

2.3 Procedimento de amassadura de argamassas

Tal como verificado por diversos autores [10, 11, 12, 13], os procedimentos de mistura têm uma influência significativa nas propriedades das argamassas auto-compactáveis no estado fresco, nomeadamente na optimização da utilização dos

superplastificantes. Os referidos autores confirmaram que o tempo de mistura decorrido até à introdução do superplastificante não é irrelevante para a eficiência do mesmo e, conseqüentemente, altera as condições de auto-compactabilidade da mistura de argamassas auto-compactáveis.

A partir da análise das diversas propostas dos referidos autores e tendo em consideração experiências anteriores ao presente trabalho, optou-se por um procedimento de mistura adaptado de Domone [10] e de Jin e Domone [11], muito semelhante ao utilizado por Nepomuceno [12] e por Liu [13]. A seqüência de amassadura adoptada para a mistura de argamassas encontra-se representada graficamente na Figura 1.



W1 = 80% da água de amassadura

W2 + Sp = 20% da água de amassadura + superplastificante

Figura 1: Seqüência de amassadura adoptada para as misturas das argamassas

A seqüência de amassadura completa demora 10 minutos no total e inicia-se com a introdução dos agregados finos (areias) e dos materiais finos que são misturados durante aproximadamente 1 minuto. A primeira parcela de água, correspondente a 80% da água total de amassadura, é então adicionada de forma lenta, sem interrupção do processo de mistura, de modo a obter uma distribuição o mais homogênea possível e mistura por mais 1 minuto. A segunda parcela de água, correspondente aos restantes 20%, é adicionada com o superplastificante bem misturado decorrido o segundo minuto de mistura, novamente de forma lenta sem interrupção do processo de mistura. Nesta fase, a mistura deve continuar, sempre com uma velocidade normal, durante 5 minutos. Passados 5 minutos de mistura com todos os componentes, desliga-se a misturadora e a amassadura fica em repouso durante 2 minutos. Caso seja necessário, esta fase poderá ser aproveitada para limpar a pá de mistura. No final dos 2 minutos de repouso e antes de iniciar os ensaios no estado fresco, procede-se a mais 1 minuto de mistura, igualmente com velocidade normal.

2.4 Descrição dos ensaios e preparação de provetes

2.3.1 Ensaio de espalhamento no mini-cone

A determinação do diâmetro médio de espalhamento através do ensaio de espalhamento com recurso a um molde tronco cônico (Figura 1) permite a determinação do parâmetro G_m . Não existindo ainda referências normativas nacionais ou internacionais para o ensaio em causa, optou-se por seguir os procedimentos de ensaio utilizados por Nepomuceno [12] e por Liu [13].

Conforme referido, neste ensaio, o valor obtido do diâmetro médio de espalhamento (D_m) é expresso através de uma área de espalhamento relativa (G_m) utilizando o método proposto por Okamura et al. [14]:

$$G_m = \left(\frac{D_m}{D_0} \right)^2 - 1 \quad 1$$

em que:

G_m = área de espalhamento relativa;

D_m = diâmetro médio de espalhamento, em mm;

D_0 = diâmetro inicial na base do cone, em mm.

2.3.2 Ensaio de escoamento no mini-funil-V

A determinação do tempo de escoamento através do ensaio de fluidez no mini-funil V (Figura 2) permite o cálculo do

parâmetro R_m . Não existindo ainda referências normativas nacionais ou internacionais para o ensaio em causa, optou-se por seguir os procedimentos de ensaio utilizados por Nepomuceno [12] e por Liu [13].



Figura 2: Ensaio de espalhamento (esquerda) e de escoamento (direita) em argamassas

Conforme referido, neste ensaio, o resultado obtido pode ser apresentado directamente pelo tempo de escoamento (t), medido em segundos. Pode, no entanto, determinar-se a velocidade relativa de escoamento R_m utilizando, tal como no ensaio de espalhamento, o método desenvolvido por Okamura et al. [14]:

$$R_m = \frac{10}{t} \quad 2$$

em que:

R_m = velocidade relativa de escoamento, em s^{-1} ;

t = tempo de escoamento, em segundos.

2.3.3 Ensaio de compressão e de flexão

Os ensaios de compressão e de flexão foram realizados de acordo com os procedimentos descritos na NP EN 1015-11: 1999, aos 7, 28 e 91 dias de idade, em provetes três prismáticos de 160 x 40 x 40 mm. Os referidos provetes são inicialmente ensaiados à flexão, sobrando deste ensaio duas metades sensivelmente iguais que foram ensaiadas à compressão.

2.3.4 Absorção de água por imersão

A absorção de água (volume total de poros acessíveis ou porosidade “aberta”) foi determinada de acordo com o procedimento descrito na especificação LNEC E 394, aos 28 dias de idade, em três provetes cúbicos com 100 x 100 x 100 mm. Os referidos valores foram obtidos com recurso a três pesagens, nomeadamente: massa do provete na água (pesagem hidrostática) saturado por imersão em água até massa constante (variação inferior a 0,1%), massa do provete saturado e massa do provete seco em estufa a 105 ± 5 °C até massa constante (variação inferior a 0,5%).

2.3.6 Carbonatação

A determinação da resistência à carbonatação foi realizada de acordo com a especificação LNEC E 391 (1993) e com a recomendação RILEM CPC-18 (1988). Todos os provetes ensaiados foram sujeitos a um processo de cura húmida por imersão em água a 20 ± 2 °C até 14 dias antes do início do ensaio. Nessa data, procedeu-se ao seccionamento em provetes de aproximadamente 50 mm de espessura e os topos foram protegidos com um revestimento isolante de resina acrílica, com excelente resistência à exposição ambiental. Posteriormente, os provetes foram condicionados a 20 ± 2 °C e 50% de HR, até à data do início do ensaio (28 dias). Aos 28 dias de idade, os provetes foram colocados numa câmara com $5 \pm 1\%$ de CO₂, $60 \pm 5\%$ de HR e uma temperatura de 23 ± 3 °C. Decorridos 14, 28, 56 e 91 dias de exposição nas referidas condições, os provetes foram retirados da câmara, seccionados e, através de um método colorimétrico (com fenolftaleína a 0,1%), foi identificada e medida a profundidade de carbonatação.

3. APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DE RESULTADOS

É apresentada na Tabela 5 uma síntese dos resultados obtidos no estado fresco das misturas estudadas. De acordo com o espectável, é possível observar uma diminuição significativa do espalhamento com a adição tanto de nano-titânio como de nano-sílica para as misturas 1:1. Já a fluidez avaliada pelo escoamento no funil V apresenta uma variação mínima aumentando apenas nas misturas NS1Q e NS1R.

Verifica-se, no entanto, que as perdas tanto de espalhamento como de escoamento apresentadas pelas misturas 1:2 e independentemente do nano material utilizado é quase nula quando comparada com a argamassa de referência e ao contrário do observado nas misturas 1:1. Nestas misturas, verifica-se inclusive um ligeiro aumento no diâmetro de espalhamento por comparação com a argamassa de referência (1:2).

Tabela 5 - Resultados no estado fresco

Mistura	Espalhamento		Escoamento	
	D_m (mm)	G_m	t (s)	R_m (s^{-1})
1:1	310,0	8,6	7,8	1,3
NT1A (0,05%NT)	330,0	9,9	7,4	1,4
NT1B (0,75%NT)	275,0	6,6	7,9	1,3
NT1C (1,00%NT)	260,0	5,8	9,9	1,0
NS1P (0,75%NS)	284,0	7,1	7,6	1,3
NS1Q (1,50%NS)	282,5	7,0	9,0	1,1
NS1R (3,00%NS)	265,0	6,0	9,7	1,0
1:2	280,0	6,8	12,5	0,8
NT2A (0,05%NT)	290,0	7,4	12,0	0,8
NT2B (0,75%NT)	297,5	7,9	11,2	0,9
NT2C (1,00%NT)	292,5	7,6	12,7	0,8
NS2P (0,75%NS)	297,5	7,9	12,6	0,8
NS2Q (1,50%NS)	292,5	7,6	12,8	0,8
NS2R (3,00%NS)	285,0	7,1	13,0	0,8

Os resultados obtidos para a compressão uniaxial, flexão e porosidade, para todas as misturas produzidas, são apresentados na Tabela 6. Da análise da referida tabela, é possível observar que a evolução da resistência à compressão das misturas 1:1 é menos significativa independentemente do nano material utilizado. Verifica-se nas misturas 1:1 que a perda de resistência à compressão com a adição tanto de SiO_2 como de TiO_2 , mesmo para 91 dias de idade, apresenta valores inferiores a 10% mesmo para adições de 3% de SiO_2 . Ainda nas misturas 1:1, é possível observar que as maiores perdas de resistência à compressão ocorrem aos 91 dias de idade na mistura de 1% de TiO_2 com um valor na ordem de 17%.

Nas misturas 1:2, é possível observar uma variação praticamente negligenciável da evolução da resistência à compressão com a adição de nano materiais. É desse modo de salientar uma perda máxima inferior a 6% para as misturas NT2B (0,75% de TiO_2) e NS2Q (1,50% SiO_2).

Relativamente à resistência à flexão e analisando os resultados apresentados na Tabela 6, verifica-se, de acordo com o expectável, uma dispersão menos acentuada dos respectivos valores quando comparados com os obtidos na resistência à compressão. É neste ensaio possível observar um aumento menos significativo nos respectivos valores com a adição tanto de TiO_2 como de SiO_2 . Desse modo, verifica-se que, nas idades mais avançadas (91 dias), a resistência à flexão nas misturas 1:2 com 3% de SiO_2 aumenta aproximadamente 4% (relativamente à mistura de referência) enquanto nas misturas 1:1 o referido aumento é de quase 20%.

A porosidade aberta determinada pelo ensaio de absorção de água por imersão apresenta valores perfeitamente enquadrados com os observados por outros autores em misturas equivalentes [1, 4, 5]. Verificam-se valores de porosidade inferiores com a adição de 0,75% de TiO_2 e valores máximos para as misturas com SiO_2 independentemente da percentagem de adição utilizada.

Tabela 6 - Resultados no estado endurecido

Mistura	Resistência à compressão (MPa)			Resistência à flexão (MPa)			Porosidade (%)
	7 dias	28 dias	91 dias	7 dias	28 dias	91 dias	28 dias
1:1	75,5	91,4	106,3	11,1	11,8	13,7	6,2
NT1A (0,05%NT)	54,5	83,1	108,1	8,2	13,1	14,9	6,4
NT1B (0,75%NT)	75,3	79,1	93,0	13,0	14,0	13,1	6,4
NT1C (1,00%NT)	66,9	84,2	88,1	6,9	12,9	13,4	5,8
NS1P (0,75%NS)	77,2	88,4	96,7	13,8	13,4	14,8	5,8
NS1Q (1,50%NS)	70,0	84,2	94,2	12,8	12,0	8,4	7,6
NS1R (3,00%NS)	71,6	68,3	94,7	11,8	12,5	13,7	7,1
1:2	74,2	94,9	101,6	8,8	13,5	12,9	4,1
NT2A (0,05%NT)	73,4	88,6	104,1	12,4	13,6	11,8	5,9
NT2B (0,75%NT)	62,3	87,8	92,7	10,2	12,1	9,9	5,5
NT2C (1,00%NT)	62,2	76,6	98,8	10,7	14,2	10,5	6,5
NS2P (0,75%NS)	70,3	83,3	98,4	11,0	11,5	13,8	7,0
NS2Q (1,50%NS)	73,6	86,4	92,0	13,5	12,0	14,5	7,5
NS2R (3,00%NS)	71,9	86,3	98,9	13,0	12,2	14,2	6,1

Os resultados da profundidade de carbonatação, para todas as misturas produzidas, são apresentados na Tabela 7. Nessa tabela, é possível observar, para cada uma das idades de ensaio, o valor médio da profundidade média de carbonatação (d_{kmxd}). Na referida tabela, a designação “<1” nas profundidades de carbonatação significa que, nessas misturas, não foi detectada carbonatação mensurável, em nenhuma das idades analisadas.

Numa primeira análise dos resultados de profundidade de carbonatação apresentados na Tabela 7, verifica-se que, nas misturas 1:1 com e sem TiO₂ e na mistura com 0,75% de SiO₂, não se observou qualquer efeito de carbonatação até ao fim de 91 dias de exposição na câmara de carbonatação acelerada. O mesmo ocorre nas misturas 1:2 de referência e com 0,5% de TiO₂, isto é, as referidas misturas revelaram-se praticamente impenetráveis à carbonatação nas idades estudadas. As restantes misturas revelaram um comportamento muito semelhante com profundidades de penetração sempre inferiores a 10 mm, à excepção da mistura 1:2 com a adição de 3% de SiO₂ que apresenta logo aos 28 dias de exposição na câmara de carbonatação, profundidades de penetração de 15 mm e atingindo aos 91 dias (exposição máxima avaliada neste estudo), 20 mm de penetração de CO₂. Em geral, é possível observar que as misturas com TiO₂ apresentam profundidades de penetração da carbonatação inferiores às obtidas pelas misturas com SiO₂.

Tabela 7 - Profundidades de carbonatação [mm]

Mistura	d_{km14d}	d_{km28d}	d_{km56d}	d_{km91d}
1:1	<1	<1	<1	<1
NT1A (0,5%NT)	<1	<1	<1	<1
NT1B (0,75%NT)	<1	<1	<1	<1
NT1C (1,00%NT)	<1	<1	<1	<1
NS1P (0,75%NS)	<1	<1	<1	<1
NS1Q (1,50%NS)	3	4	4	6
NS1R (3,00%NS)	3	4	8	8
1:2	<1	<1	<1	<1
NT2A (0,5%NT)	<1	<1	<1	<1
NT2B (0,75%NT)	2	3	4	8
NT2C (1,00%NT)	3	3	3	5
NS2P (0,75%NS)	2	3	6	8
NS2Q (1,50%NS)	3	3	6	8
NS2R (3,00%NS)	3	15	16	20

4. CONCLUSÕES

- Todas as misturas de argamassas auto-compactáveis produzidas com ou sem nano materiais (SiO₂ e TiO₂) satisfazem as orientações EFNARC relativamente às propriedades no estado fresco, nomeadamente as referentes ao ensaio do mini-cone e do mini-funil V;
- pode concluir-se que não existem alterações significativas às propriedades no estado fresco com a adição de nano materiais (SiO₂ e TiO₂). Isto verifica-se de igual modo tanto nas misturas 1:1 como nas 1:2;
- nas propriedades no estado endurecido, pode concluir-se que a taxa de crescimento da resistência à compressão diminui com a adição de nano materiais (SiO₂ e TiO₂) em ambas as misturas (1:1 e 1:2);
- a resistência à flexão aumenta com a adição de nano partículas especialmente 0.75% de TiO₂ e 1% de SiO₂, quando comparado com as misturas de referência (1:1 e 1:2);
- a absorção de água por imersão (porosidade aberta) diminui com a adição de 1% de nano titânio e 0.75% de nano sílica, quando comparado com a argamassa de referência 1:1; no entanto, aumenta para as argamassas 1:2 com nano partículas, em comparação com a de referência 1:2;
- pode-se observar que tanto as argamassas 1:1 e 1:2 com TiO₂ apresentaram profundidades de carbonatação inferiores quando comparadas com as argamassas 1:1 e 1:2 com SiO₂.

5. AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem o apoio da Fundação para a Ciência e Tecnologia (FCT) e do centro de investigação - Instituto de Engenharia de Estruturas, Território e Construção (ICIST).

6. REFERÊNCIAS

- [1] Nazari A., Riahi S., The effects of SiO₂ nanoparticles on physical and mechanical properties of high strength compacting concrete. *Composites Part B: Engineering* 2011; 42(3): 570–8.
- [2] Zhang M., Islam J., Use of nano-silica to reduce setting time and increase early strength of concretes with high volumes of fly ash or slag. *Construction Build Materials* 2012; 29: 573–80.
- [3] Criado M., Jiménez A., Palomo A., Effects of sodium sulfates on the alkali activation of fly ash. *Cement Concrete Composites* 2010; 32(8): 589–94.
- [4] Florence S., Konstantin S., Nanotechnology in concrete - A review. *Construction Building Materials* 2010; 24: 2060–71.
- [5] Nazari A., Riahi S., The effect of TiO₂ nanoparticles on water permeability and thermal and mechanical properties of high strength self-compacting concrete. *Material Science Engineering* 2010; 528: 756–63.
- [6] Shih J., Chang T., Hsiao T., Effect of nano-silica on characterization of Portland cement composite. *Material Science Engineering: A* 2006; 424(1–2): 266–74.
- [7] Chen J., Poon CS., Photocatalytic activity of titanium dioxide modified concrete materials - Influence of utilizing recycled glass cullets as aggregates. *Journal of Environmental Management* 2009; 90(11): 3436–42.
- [8] Fujishima A., Zhang X., Tryk DA., TiO₂ photocatalysis and related surface phenomena. *Surface Science Reports* 2008; 63(12): 515–82.
- [9] Li G., Properties of high-volume fly ash concrete incorporating nano-SiO₂. *Cement Concrete Research* 2004; 34(6): 1043–9.
- [10] Domone P. L., Mix design (Background document), in self-compacting concrete, state-of-the-art report of RILEM Technical Committee 174-SCC, RILEM Publications, ISBN: 2-912143-23-3, 2000, pp. 49-65.
- [11] Jin J., Domone P. L., Relationships between the fresh properties of SCC and its mortar component, In: *The 1st North American Conference on the Design and Use of Self-consolidating Concrete*, Skarendahl A. (Eds), Chicago, USA, 2002, pp. 33-38.
- [12] Nepomuceno M. C. S., Metodologia para a composição de betões autocompactáveis. Covilhã, Portugal, Universidade da Beira Interior, Departamento de Engenharia Civil, 2005, 733 p., Tese de Doutoramento em Engenharia Civil.
- [13] Liu M., Wider application of additions in self-compacting concrete, London, UK, Department of Civil, Environmental and Geomatic Engineering University College London, 2009, 392 p., PhD Thesis.
- [14] Okamura h., Ozawa K, Ouchi M., Self-compacting concrete, *Structural Concrete Journal* 2000, 1(1): 3-17.