

# REVISTA INTERNACIONAL **TECH ITT** by Construlink

ESTRUTURAS E CONSTRUÇÃO • ESTRUCTURAS Y CONSTRUCCIÓN

Vol.11  
Número

34



# EDITORIAL

Ao longo dos seus quase doze anos de existência, a RIT - Revista Internacional Tech ITT - Estruturas e Construção - tem-se afirmado como um meio de comunicação e divulgação de conhecimento entre diferentes agentes ligados à área da engenharia civil em geral e da construção em particular. Esta divulgação tem sido efectuada a nível internacional, nomeadamente nos países ibero-americanos e africanos de expressão portuguesa, o seu espaço preferencial. O facto de ser editada on line e de conter trabalhos publicados em língua portuguesa e castelhana revelou-se uma aposta acertada.



A partir do próximo número, o volume 35, a Coordenação Editorial da RIT passará a ser assegurada pela Prof. Inês Flores-Colen, docente do Departamento de Engenharia Civil, Arquitectura e Georecursos do Instituto Superior Técnico. Aproveita estas linhas para desejar as maiores felicidades à Prof.ª Inês Flores-Colen nesta estimulante missão, estando certo que saberá imprimir a este projecto o entusiasmo e a dinâmica que sempre têm caracterizado o seu trabalho.

Neste contexto, gostaria de agradecer a todos aqueles têm colaborado para o sucesso da revista, com particular destaque para os seus leitores, autores, revisores, coordenadores editoriais e colaboradores da Gatewit.

Prof. João Ramôa Correia  
(Coordenador Editorial da RIT)

## CORPO CIENTÍFICO:

### Argentina:

Prof. Raúl Husni (Univ. Buenos Aires)  
husni@arnet.com.ar

### Brasil:

Eng A. Quallarini (UFRJ) - Rio de Janeiro  
qualharini@all.com.br  
Prof. Paulo Helene (PPC-EPUSP - S. Paulo)  
helene@pcc.usp.br  
Prof. Ubiraci Souza (POLI-USP - S. Paulo)  
ubisouza@pcc.usp.br

### Chile:

Prof. Alfredo Serpell (PUC - Santiago)  
aserpell@ing.puc.cl  
Prof. Ernesto Cruz (PUC - Santiago)  
ecruz@ing.puc.cl

### Colômbia:

Prof. Jairo Uribe Escamilla (Escuela Colombiana de Ingeniería - Bogotá)  
juribe@escuelaing.edu.co

### Cuba:

Prof. J. Salvador (ISPJAE - Cuba)  
rlourdes@civil.ispjae.edu.cuba

### Espanha:

Prof. Enrique Mirambell (UPC - Barcelona)  
enrique.mirambell@upc.es  
Prof. Antonio R. Mari (UPC - Barcelona)  
antonio.mari@upc.es  
Prof. Antonio Aguado (UPC - Barcelona)  
antonio.aguado@upc.es  
Prof. Carmen Andrade (Instituto Eduardo Torroja - Madrid)  
andrade@ietcc.csic.es

### México:

Prof. Pedro Castro (Centro de Investigación y Estudios Avanzados del IPN - Mérida)  
pcastro@mda.cinvestav.mx

### Moçambique:

Eng.ª Alexandra Neves (UEM - Moçambique)  
almapane@zebra.uem.mz

### Paraguai:

Prof. Luis Alberto Lima (Facultad de Ingeniería de la UNA - Asunción)  
luislima@edan.edu.py

### Portugal:

Prof. Fernando Branco (IST - Lisboa)  
fbranco@civil.ist.utl.pt  
Prof. Júlio Appleton (IST - Lisboa)  
cristina@civil.ist.utl.pt  
Prof. António Reis (IST - Lisboa)  
antonio.reis@grid.pt  
Inv. José Catarino (LNEC - Lisboa)  
jmcatarino@lnec.pt  
Prof. A. Adão da Fonseca (FEUP - Porto)  
adaodafonseca@afaconsultores.pt  
Prof. Joaquim Figueiras (FEUP - Porto)  
jafig@fe.up.pt  
Prof. Victor Abrantes (FEUP - Porto)  
va.consultores@mail.telepac.pt  
Prof. António Tadeu (FCTUC - Coimbra)  
tadeu@dec.uc.pt





**Director:**

Prof. Fernando Branco  
fbranco@civil.ist.utl.pt

**Coordenador editorial:**

João Ramôa Correia

**Edição da revista:**

Pedro Vaz Paulo

**Edição de artigos:**

Cátia Marcelino

**Publicidade:**

Pedro Paulo

**Publicado por:**

Gatewit  
Avenida da Liberdade,  
nº 136, 4º, 5º e 6º  
1250-146 Lisboa

**Contactos:**

Tel: +351 213 155 265  
Fax: +351 210 064 616  
E-mail: info@gatewit.com  
Website: www.techitt.com

**tech ITT Press:**

- Revista Internacional tech ITT ( 3 X Ano )
- Monografias

**Assinatura:**

Custo: 50 Euros / Ano  
Grátis para autores de artigos publicados.

**03**

**EDITORIAL**

Prof. João Ramôa Correia  
Portugal

**04**

**AVALIAÇÃO DO PROCESSO DE SECAGEM COMO FORMA DE REDUZIR AS ANOMALIAS EM PAVIMENTOS DE BETÃO**

Fernando Branco, M. Lurdes Belgas  
Portugal

**12**

**VÃOS ENVIDRAÇADOS, DESEMPENHO TÉRMICO E CONFORTO TÉRMICO HUMANO – MODELO SIMPLIFICADO DE SELEÇÃO**

M.H.P Corvacho, A.M.F Oliveira  
Portugal

**22**

**PUNÇÃOAMENTO EM LAJES DE BETÃO COM FIBRAS DE AÇO**

N.D. Gouveia, D.M.V. Faria, A.M.P. Ramos  
Portugal

**32**

**BETÃO AUTO-COMPACTÁVEL (BAC) - CONTRIBUTO PARA UM DESENVOLVIMENTO SUSTENTÁVEL**

Pedro Raposeiro da Silva, Jorge de Brito  
Portugal

**42**

**A NANOTECNOLOGIA APLICADA ÀS ARGAMASSAS DE REVESTIMENTO**

Inês Flores-Colen, António Soares, Jorge de Brito  
Portugal

---

# AVALIAÇÃO DO PROCESSO DE SECAGEM COMO FORMA DE REDUZIR AS ANOMALIAS EM PAVIMENTOS DE BETÃO

**FERNANDO BRANCO**  
Professor Auxiliar  
FCTUC  
Coimbra

**M. LURDES BELGAS**  
Prof.ª Adjunta  
ESTT-IPT  
Tomar

## SUMÁRIO

A presença de humidade no interior das lajes de betão ou nas argamassas de regularização dos pavimentos e a ocorrência de migração dessa humidade em direcção à superfície do pavimento pode deteriorar o revestimento e condicionar a utilização de determinados tipos de revestimentos susceptíveis à presença de água. O presente trabalho procura contribuir para a sistematização do conhecimento sobre o processo e o tempo de secagem destes pavimentos, de modo a que possuam um nível de humidade aceitável para a aplicação de diferentes tipos de revestimentos.

## ABSTRACT

The presence of moisture within the concrete or mortar layer in floor slabs, associated with the migration of this moisture towards the surface of the pavement may deteriorate the finishing layer and restrict the use of some types of floor coverings, more sensitive to the presence of water. The present work aims at contributing to the systematization of knowledge on the drying process of concrete slabs, to ensure that the moisture level reaches acceptable values for the application of different types of coatings.

## 1. INTRODUÇÃO

A presença de humidade no interior das lajes de betão ou nas argamassas de regularização dos pavimentos, quer de pisos térreos quer de pisos elevados, pode ter influência no comportamento do revestimento. De facto, a ocorrência de migração de humidade em direcção à superfície do pavimento poderá meso condicionar a utilização de determinados tipos de revestimentos de piso [1]. O excesso de água residual proveniente do substrato é uma das possíveis causas para o aparecimento de patologias em pavimentos de betão, quando são utilizados revestimentos susceptíveis à presença de água. Essas patologias incluem degradação, descoloração, descolamento, delaminação e perda de aderência. Para além das patologias dos revestimentos, existe ainda o risco de emissão de compostos orgânicos voláteis, que podem originar problemas de saúde [2, 3].

Para prevenir a ocorrência destas patologias, antes da aplicação do revestimento deverá ser permitido um tempo de secagem do substrato suficiente para que seja atingido um nível de humidade adequado ao tipo de revestimento a utilizar. Para esse efeito, é importante conhecer o processo de secagem do betão, identificando os factores que o influenciam [4].

A avaliação da humidade pode ser feita de forma quantitativa, através do teor de humidade, do fluxo de humidade ou da humidade relativa interna do betão. Para cada uma das formas de expressar o nível de humidade, devem estabelecer-se parâmetros, em conformidade com o material a ser aplicado, considerados aceitáveis para a aplicação do revestimento. Também é necessário conhecer e avaliar os métodos de medição da humidade do betão.

## 2. O PROCESSO DE SECAGEM DE PAVIMENTOS DE BETÃO

A secagem dos materiais cimentícios ocorre como resultado de vários processos: da evaporação da água da superfície para o ambiente; da auto-dessecação que resulta da ligação química e física aos produtos de hidratação e do fluxo de humidade no substrato ou noutros materiais em contacto com o material em hidratação. Para que se reduza o excesso de humidade, deverá ser permitida a secagem do betão, para que este atinja um nível de humidade adequado ao tipo de revestimento a utilizar.

Para evitar os danos causados ao revestimento pelo excesso de humidade, é importante conhecer o processo de secagem do betão, e identificar os factores que o influenciam [4]: composição do betão, relação água/cimento, tempo e condições de cura [5, 6], temperatura e humidade relativa ambiente, a distribuição da humidade no interior do betão e a sua redistribuição após a aplicação de um revestimento impermeável.

A presença de humidade pode ser avaliada de forma qualitativa, ou medida de forma quantitativa, através do teor de humidade, do fluxo de humidade ou da humidade relativa interna do betão. Para cada uma das formas de expressar o nível de humidade devem estabelecer-se parâmetros, em conformidade com o material a ser aplicado, considerados aceitáveis para a aplicação do revestimento.

A secagem do betão decorre da complexa relação entre a quantidade de água quimicamente ligada e a água fisicamente ligada e a capacidade do sistema de poros do betão no transporte da água livre. Esta capacidade de transporte é influenciada pela hidratação do cimento, a qual por sua vez é função da relação água/cimento, temperatura e humidade relativa ambiente.

A água em excesso no interior do betão é eliminada por evaporação. Este processo é influenciado pela idade do betão, temperatura e humidade relativa no ambiente em contacto com o substrato.

Uma vez que a secagem do betão se processa de forma muito lenta, pode haver excesso de humidade no betão durante um longo período de tempo.

Normalmente, apenas uma parte deste excesso de humidade é eliminada antes da aplicação do revestimento, sendo que a quantidade remanescente de humidade na estrutura não deverá causar quaisquer danos aos materiais circundantes, especialmente revestimentos de pavimentos e respectivos materiais de aplicação. Quando da aplicação de revestimentos sensíveis à humidade devem, por isso, ser observados cuidados específicos.

O comportamento do revestimento após a aplicação é também um dado importante, uma vez que a humidade não se distribui de maneira uniforme ao longo da espessura do substrato de betão, sendo menor próximo da superfície em contacto com o ambiente, e aumentando para o seu interior.

A secagem é muitas vezes interrompida precocemente pela aplicação de um revestimento impermeável, fazendo com que a evaporação à superfície seja drasticamente reduzida. Isto significa que o teor de humidade próximo da superfície aumenta, uma vez que continua o fluxo de humidade nessa direcção. O teor de humidade aumentará até que seja alcançada uma nova condição de equilíbrio entre a lenta evaporação, através do revestimento impermeável aplicado, e o fluxo de humidade em direcção à superfície.

A secagem de uma laje de betão inicia-se pela superfície, enquanto no interior da laje o teor de humidade permanece elevado. Quando se aplica um revestimento impermeável sobre a superfície da laje, a humidade do betão abaixo deste revestimento é redis-

tribuída uniformemente até que seja alcançada uma nova condição de equilíbrio. Este princípio é ilustrado na Figura 1a), para uma situação em que a secagem ocorre pelos dois lados da laje [7].

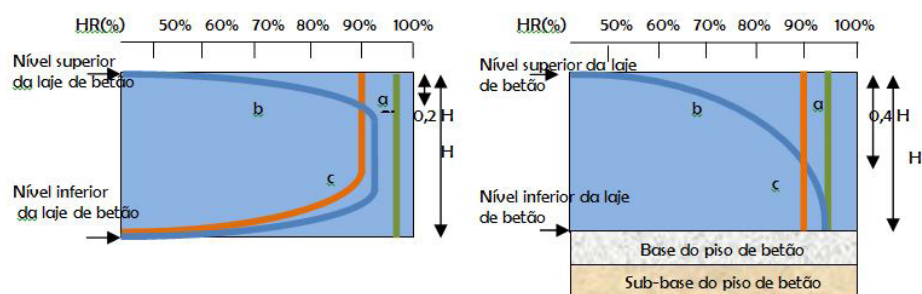


Figura 1 - a) Distribuição da humidade relativa numa laje, submetida à secagem pelos dois lados, antes e após a secagem e depois de aplicado o revestimento do piso; b) Distribuição da humidade relativa antes e após a secagem e aplicação de um revestimento num pavimento de betão de um piso térreo [7].

Na Figura 1 - a), **a** representa o perfil de distribuição da humidade antes da secagem, **b** o perfil de distribuição da humidade após a secagem, **c** o perfil de distribuição da humidade após a aplicação do revestimento e a redistribuição da humidade, **H** é a espessura da laje e **0,2 H** a profundidade equivalente. Para uma determinada profundidade, medida a partir da superfície da laje antes de ser revestida, que se designa por “profundidade equivalente”, o nível de humidade é exactamente igual ao nível que será atingido na superfície da laje após a aplicação do revestimento. Esta “profundidade equivalente” varia com o modo de secagem da laje.

No caso de a secagem ocorrer por ambos os lados da laje, situação corrente de lajes de edifícios em pisos elevados, a profundidade equivalente é igual a 20% da espessura da laje. Nesta situação, quando um dos lados da laje é revestido, a secagem continua através do lado que não se encontra revestido. Isto significa que o nível de humidade será novamente redistribuído, diminuindo junto à superfície já revestida.

No caso de a secagem ocorrer apenas por um dos lados da laje, por exemplo no caso de pisos térreos de betão, o valor adoptado para profundidade equivalente é igual a 40% da espessura da laje (ver Figura 1b). Neste caso, a humidade no piso de betão, após o revestimento da superfície, irá atingir o equilíbrio mantendo-se constante em toda a espessura do piso.

Conclui-se que, no caso da aplicação de um revestimento impermeável susceptível à presença de água, o aumento da quantidade de água no substrato de betão junto à superfície após a redistribuição, poderá implicar danos no revestimento.

Deste modo, é importante definir qual o nível de humidade aceitável e encontrar métodos que permitam estimar o tempo de secagem das argamassas até esse nível ser atingido.

### 3. TEMPOS DE SECAGEM RECOMENDADOS

Diversas organizações internacionais têm procurado estabelecer o tempo de secagem e o valor de humidade necessários para que seja possível aplicar, com sucesso, os revestimentos finais de piso (ver Tabela 1).

Em Inglaterra, recomenda-se que os revestimentos de piso sejam aplicados apenas quando a superfície de betão atinge a humidade relativa de 75%, determinada através de medições realizadas com um higrómetro de superfície.

Segundo a American Society for Testing Materials (ASTM), o tempo de secagem necessário para que um piso de betão atinja um nível de humidade satisfatório, de modo a evitar a deterioração do revestimento, varia de seis semanas a seis meses. A norma ASTM E 1907-97 [8] apresenta uma lista dos tempos de secagem recomendados por diferentes instituições.

O Carpet and Rug Institute (CRI) recomenda um período de 90 a 120 dias para que o piso de betão atinja um nível de humidade satisfatório para aplicação de revestimentos têxteis e de borracha.

O Resilient Floor Covering Institute (RFCI) estabelece que o piso de betão seja curado e seco por um período mínimo de seis semanas, antes da aplicação de qualquer tipo de revestimento resiliente.

A Portland Cement Association (PCA) realça que o período de secagem varia em função das condições ambientais, tipo de betão, espessura e localização do piso de betão, sendo necessário alguns meses de secagem para que seja atingido o nível de humidade

satisfatório, sendo o mínimo de 60 dias.

A World Floor Covering Association (WFCA) refere uma duração mínima para a secagem de 28 dias, recomendado por alguns fabricantes para aplicação do revestimento, uma vez que este período é função de um grande número de variáveis.

Em Portugal, o LNEC recomenda um teor de água máximo admissível da base de assentamento, no momento da aplicação do revestimento, de 2,5% em relação ao peso do material seco [9]. Esta condição obriga a que após a conclusão das camadas de regularização que eventualmente se venham a executar sobre o pavimento, e desde que não tenham espessuras superiores a 40 mm, se aguarde um intervalo de tempo não inferior a quatro semanas, no Verão, e seis semanas no Inverno. Quando as camadas possuam espessuras superiores a 40 mm, deverão dilatar-se os prazos indicados, no mínimo uma semana por cada centímetro de espessura adicional da camada de regularização.

Tabela 1 – Tempos de secagem recomendados

REFERÊNCIA	RECOMENDAÇÃO
ASTME 1907-97	Seis semanas a seis meses
CRI – Carpet and Rug Institute	12 a 16 semanas
WFC – World Floor Covering Association	28 dias (não pode ser utilizado como critério geral)
RFCI – Resilient Floor Covering Institute,	Mínimo 6 semanas
PCA – Portland Cement Association,	Mínimo de 8 semanas
LNEC – Bases de Assentamento de Pisos Resilientes	4 semanas no Verão 6 semanas no Inverno

Baseando-se em resultados experimentais, Hedenblad [7] estimou os tempos de secagem esperados para o betão corrente, atendendo à relação água/cimento e a valores de 85% e 90% para a humidade relativa. Estes tempos deverão ser modificados pela aplicação de factores de correcção que tenham em atenção parâmetros como a relação água/cimento, a espessura da laje, o modo como se processa a secagem (por uma face ou por ambas as faces), a temperatura e a humidade relativa ambiente e as condições de cura. Nas tabelas seguintes apresentam-se os factores de correcção para os tempos de secagem. A Tabela 2 apresenta os tempos de secagem em função da humidade relativa do betão e da relação água/cimento. A Tabela 3 ilustra o factor de correcção tendo em atenção a espessura do elemento de betão. A Tabela 4 apresenta os factores de correcção para atender ao modo como se processa a secagem: por uma face, ou por ambas as faces da laje. A Tabela 5, mostra os factores de correcção que atendem às condições ambientais de humidade relativa e temperatura. A Tabela 6 apresenta os factores de correcção que têm em atenção as condições de cura.

Tabela 2 – Tempo de secagem para o betão

<i>Humidade Relativa do Betão (%)</i>	<i>Relação água/cimento</i>			
	<b>0,4</b>	<b>0,5</b>	<b>0,6</b>	<b>0,7</b>
<b>85</b>	50 dias	90 dias	135 dias	180 dias
<b>90</b>	20 dias	45 dias	65 dias	95 dias

Tabela 3 – Factores de correcção para a espessura

<i>Espessura (mm)</i>	<i>Relação água-cimento</i>			
	<b>0,4</b>	<b>0,5</b>	<b>0,6</b>	<b>0,7</b>
<b>100</b>	0,4	0,4	0,4	0,4
<b>150</b>	0,8	0,8	0,8	0,7
<b>180</b>	1,0	1,0	1,0	1,0
<b>200</b>	1,1	1,1	1,1	1,2
<b>250</b>	1,3	1,4	1,5	1,8

Tabela 4 - Factores de correcção para o tipo de secagem (um ou dois lados)

<i>Humidade Relativa do Betão (%)</i>	<i>Relação água-cimento</i>			
	<b>0,4</b>	<b>0,5</b>	<b>0,6</b>	<b>0,7</b>
<b>Um lado</b>	2,0	2,3	2,6	3,2
<b>Dois lados</b>	1,0	1,0	1,0	1,0

Tabela 5 - Factores de correcção para as condições ambientais (Humidade Relativa e Temperatura)

<i>Humidade Relativa do ar (%)</i>	<i>Temperatura do ar (°C)</i>			
	<b>10</b>	<b>18</b>	<b>25</b>	<b>30</b>
<b>35</b>	1,2	0,8	0,7	0,6
<b>50</b>	1,2	0,9	0,7	0,6
<b>60</b>	1,3	1,0	0,8	0,7
<b>70</b>	1,4	1,1	0,8	0,7
<b>80</b>	1,7	1,2	1,0	0,9

Tabela 6 - Factores de correcção atendendo às condições de cura

<i>Condições de cura</i>	<i>Relação água-cimento</i>					
	<b>0,5</b>		<b>0,6</b>		<b>0,7</b>	
	<b>85%</b>	<b>90%</b>	<b>85%</b>	<b>90%</b>	<b>85%</b>	<b>90%</b>
<b>Secagem do betão até à humidade relativa de:</b>						
Um dia ao ar livre	1,0	0,5	1,0	0,5	1,0	0,7
Duas semanas à chuva, duas semanas ao ar livre	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0
Quatro semanas ao ar livre	1,0	0,5	1,0	0,7	1,0	0,8
Quatro semanas à chuva	1,4	1,0	1,4	1,3	1,3	1,3

O Quadro 1 apresenta tempos de secagem dos suportes, admissíveis para aplicação de revestimentos cerâmicos, em função do tipo de suporte, das condições de aderência entre o revestimento e o suporte e das solicitações dos pavimentos (excluindo os pavimentos radiantes eléctricos) [10].



Quadro 1 – Tempos de secagem do suporte para aplicação do revestimento cerâmico

Tipo de suporte sobre o qual se aplica o revestimento cerâmico	Idade mínima do suporte			
	Solicitações fracas e moderadas		Solicitações fortes	
	Colocação dessolidarizada	Colocação aderente	Colocação dessolidarizada	Colocação aderente
Betonagem sobre o terreno	2 Semanas	1 Mês	2 Semanas	1 Mês
Pré-lajes em betão armado	1 Mês	6 Meses	2 Meses	6 Meses
Lajes sobre isolamento ou camadas dessolidarizadas	2 Semanas	1 Mês	Não aplicável	Não aplicável
Lajes aquecidas	2 Semanas	1ª Semana após a colocação do aquecimento	Não aplicável	Não aplicável
Protecção estanque	Não aplicável	1 Semana	Não aplicável	Não aplicável
Camadas de forma	24 Horas	24 Horas	24 Horas	24 Horas

#### 4. MEDIÇÃO DA HUMIDADE NO BETÃO

Uma vez que existe grande variação para os tempos de secagem recomendados, bem como um grande número de factores que influenciam a velocidade de secagem [11], constata-se que não é possível fixar, de uma forma objectiva, um período de espera único a respeitar antes da aplicação do revestimento. Deste modo, verifica-se que é importante determinar as condições de humidade, em cada caso concreto, realizando a medição da humidade do betão antes da aplicação do revestimento.

Os métodos de ensaio usados para medir a humidade do betão podem ser classificados como qualitativos ou quantitativos. Os ensaios qualitativos fornecem indicação geral sobre a humidade, enquanto os testes quantitativos produzem resultados numéricos. Ambos os ensaios fornecem informação útil. Contudo, os ensaios qualitativos não devem ser usados para determinar se o nível de humidade do pavimento é aceitável. Apesar do resultado de um ensaio qualitativo que indique a presença de humidade excessiva ser uma forte indicação de que o pavimento ainda não está apto para receber o adesivo e o revestimento de piso, o resultado de um teste qualitativo que não indique humidade excessiva deverá ser seguido de um ensaio quantitativo, para assegurar que o pavimento está, de facto, convenientemente seco.

Os métodos existentes podem constar de observações visuais, testes físicos ou de medições quantitativas do teor de humidade, do fluxo de humidade ou da humidade relativa interna do betão [12, 13, 14, 15, 16, 17, 18].

Em vários países, organizações como a ASTM, CRI e NCFI, normalizaram testes para avaliar as condições de humidade de um piso de betão, a fim de determinar se são aceitáveis para receber o revestimento.

Os principais testes para avaliar a condição de humidade de um substrato de betão constam na norma ASTM E 1907-97 [8], que descreve procedimentos para determinar a quantidade de água ou vapor de água presente ou emitida por um piso de betão, e estabelece critérios para avaliar o estado de um piso de betão, para receber revestimentos sensíveis à humidade.

## 5. REFERÊNCIAS

- [1] Brewer, H.W., "Moisture Migration - Concrete Slab-on-ground Construction", *Journal of the PCA, Research and Development Laboratories*, 1965, Vol. 7, No. 2, pp. 2-17.
- [2] Anderberg, A.; Wadsö, I., "Drying and Hydratation of Cement Based Self-Leving Flooring Compounds", *Drying Technology Journal*, 2007, Vol. 25, No.12, pp. 1995-2003.
- [3] Persson, B., "Compatibility between flooring materials and concrete", *Materials and Structures*, 2002, Vol. 35, No. 3, pp. 170-182.
- [4] Lopes, E.M.; Barros, M.M.S.B., *Influência da Humidade do substrato no desempenho de revestimento de piso de edifícios*, Tese de Mestrado, 2004, Universidade de S. Paulo, Brasil, Escola Politécnica.
- [5] Suprenant, B.A., "Moisture Movement through Concrete Slabs", *Concrete Construction*, 1997, Vol. 42, No. 11, pp. 879-885.
- [6] Rantala b, J., Leivo, V., "Drying of in situ cast concrete ground slabs and covering criteria", *Building and Environment*, 2009, Vol. 44, No. 3, pp. 331-337.
- [7] Hedenblad, G., *Concrete Drying Time - Predict concrete drying times before placing floor coverings*, Concrete, Technology Today, Portland Cement Association, 1998, Vol.19. No.2, pp. 4-5.
- [8] ASTM E 1907-97- *Standard Practices for Determining Moisture-Related Acceptability of Concrete Floors to Receive Moisture Sensitive Finishes*, 1997, 12 p.
- [9] Nascimento, J.M., *Bases de assentamento de revestimentos de piso resilientes*, ITE 38, 1995, LNEC, Lisboa.
- [10] DTU 52.1 - *Travaux de bâtiment revêtements de sol scellés partie 1: cahier des clauses techniques*, 2003, AFNOR.
- [11] Bissonnette, B.; Pierre, P.; Pigeon, M., Influence of key parameters of shrinkage of cementitious materials, *Cement and Concrete Research*, 1999, Vol.29, No. 10, pp.1655-1662.
- [12] Hedenblad, G., "Measurement of moisture in high performance concrete", Lund Institute of Technology, Division of Building Materials, 1995, Sweden, pp. 31-45.
- [13] Beyea, S.D., (1998) "Magnetic Resonance Imaging and Moisture Content Profiles of Drying Concrete", *Cement and Concrete Research*, 1998, Vol. 28, No. 3, pp.453-463.
- [14] Persson, B., "A NORDTEST method for verification of self-desiccation in concrete", *Cement and Concrete Research*, 2001, Vol. 31, No. 2, pp.199-203.
- [15] Wang, J., et al., "Membrane Curing of Concrete: Moisture Loss", *Cement and Concrete Research*, 1994, Vol. 24, No. 8, pp.1463-1474.
- [16] Terrill, J. M., et al., (1986) "Non-linear moisture profiles and shrinkage in concrete members", *Magazine of Concrete Research*, 1986, Vol. 38, No. 137, 1986, pp.220-225.
- [17] NT BUILD 439 - *Concrete; Hardened: Relative Humidity Measured in Drilled Holes*, 1995, Nordtest Method, Espoo, Finland.
- [18] ASTM D4263 - 83, *Standard Test Method for Indicating Moisture in Concrete by the Plastic Sheet Method*, 2005.



**MARIA DE LURDES BELGAS**

Professora Adjunta

ESTT/IPT

Licenciada em Engenharia Civil pelo IST, mestre em Ciências da Construção pela FCTUC desenvolve trabalhos de investigação em betões com incorporação de cortiça. Elabora relatórios técnicos de levantamento diagnóstico e proposta de correcção de patologias em edifícios.



**FERNANDO G. BRANCO**

Professor Auxiliar

DEP. ENG. CIVIL/UC

Doutorado em Eng. Civil pela Univ. de Coimbra Professor auxiliar nesta Universidade realiza trabalho de investigação na área de betões reforço estrutural de elementos de betão e sua protecção ao fogo.

---

# VÃOS ENVIDRAÇADOS, DESEMPENHO TÉRMICO E CONFORTO TÉRMICO HUMANO – MODELO SIMPLIFICADO DE SELEÇÃO

**M. H. P. CORVACHO**  
Prof.ª Doutora Eng.ª Civil  
FEUP  
Porto

**A. M. F. OLIVEIRA**  
Prof.º Eng.º Civil  
ESTGV / IPV  
Viseu

## SUMÁRIO

Este trabalho faz parte de um estudo de campo integrado no programa doutoral em engenharia civil, com o qual se pretende compreender melhor o impacto dos vãos envidraçados no desempenho térmico da envolvente dos edifícios de habitação, na sua eficiência energética e no conforto térmico dos seus ocupantes.

## ABSTRACT

This work is part of an integrated field study in the doctoral program in civil engineering, with which you want to better understand the impact of glazing on the thermal performance of the building envelope of housing, energy efficiency and thermal comfort of its occupants.



## 1. INTRODUÇÃO

Por razões de saúde e produtividade dos trabalhadores (ocupantes) a melhoria das condições do ambiente de trabalho (interior) tornou-se uma necessidade. Com o desenvolvimento das tecnologias de controlo ambiental mecânico assim como o aumento dos padrões de vida, a utilização de sistemas centralizados de ar condicionado a custos mais acessíveis tornaram-se comuns.

De acordo com a informação do Balanço Energético [1], o consumo de energia no sector doméstico em Portugal, não incluindo o consumo de combustíveis nos veículos utilizados no transporte individual dos residentes no alojamento, representava, em 2009, 17,7% do total do consumo final de energia, apresentando uma taxa média de crescimento anual de 1,5% entre os anos de 1989 e 2009.

É cada vez mais imperativo investir na melhoria das características de comportamento térmico dos elementos da envolvente do edifício, principalmente numa perspectiva de conservação de energia, mas também de permitir o reforço de numerosas vantagens (maior durabilidade da construção e uma maior estanquidade do edifício), e ainda de promover o uso de tecnologias de baixo custo energético, tais como soluções de aquecimento e arrefecimento passivo [2].

Pode-se dizer que o “sucesso” de um edifício depende de um ambiente interior confortável e alcançado sem aumentar a utilização de energia. Embora as definições gerais dadas ao conforto térmico tenham sido objecto de profunda investigação e debate filosófico, não deixam de enfatizar que o juízo de conforto é um processo cognitivo que é influenciado por uma combinação de fatores físicos, psicológicos e fisiológicos. Em geral, o conforto é atingido quando a temperatura do corpo é mantida dentro de uma faixa estreita, a humidade da pele é baixa, e o esforço fisiológico de regulação é mínimo. Para quantificar o conforto térmico nas zonas próximas dos vãos envidraçados, deve ser avaliado o ambiente térmico, incluindo as condições climáticas, temperatura do ar interior, a temperatura média radiante e a temperatura radiante assimetria, além de definir outros parâmetros ambientais e pessoais. Os ocupantes localizados perto dos vãos envidraçados muitas vezes experimentam desconforto térmico.

No Inverno, as temperaturas da superfície dos vãos envidraçados geralmente são inferiores à temperatura do ar interior, possivelmente causando desconforto devido à assimetria da temperatura radiante e temperatura operativa baixa. Já no verão as temperaturas da superfície do vão envidraçado são em geral mais elevadas do que a temperatura do ar interior, muitas vezes causando desconforto devido à elevada assimetria da temperatura radiante e temperatura operativa alta.

Até à data, tem sido feito pouco trabalho de investigação específico em relação ao conforto térmico dos ocupantes no perímetro das zonas envidraçadas, também, poucos a ter em conta o efeito da radiação solar, [3][4][5][6][7][8][9][10][11][12]. A maioria dos trabalhos de investigação sobre o efeito da radiação solar no conforto térmico, assumem o estado estacionário para as condições térmicas. Na realidade, o ambiente térmico no perímetro dos vidros é altamente transitório. Têm sido feitos esforços significativos em todo o mundo para minimizar o consumo de energia, promovendo a utilização de ferramentas de simulação de edifícios. Desta forma, a melhoria da precisão dos modelos matemáticos é também de importância primordial.

Por exemplo, a transferência de calor por radiação de grande comprimento de onda “long-wave radiation” é calculado utilizando um fator geométrico que é denominado como o fator de forma “view factor”, que é normalmente estimado, de maneira simplificada por programas de simulação de edifícios, especialmente quando não há nenhuma informação na literatura, devido às complexidades para resolver o integral duplo que define o fator de forma entre duas superfícies. Soluções analíticas só estão disponíveis na literatura para um número restrito de configurações simples. Esta simplificação no cálculo do fator de forma pode implicar erros de cálculo na avaliação das temperaturas da envolvente interna o que pode causar discrepâncias na previsão do nível de conforto térmico e do consumo de energia, principalmente quando as superfícies apresentam geometrias complexas, aberturas (janelas e portas) e quando existem obstruções entre elas [13].

## 2. MODELOS DE CONFORTO TÉRMICO ADOPTADOS

### 2.1 Enquadramento

No programa doutoral em engenharia civil pretende-se quantificar as condições de conforto térmico dos ocupantes nas zonas próximas dos vãos envidraçados, em edifícios de habitação e de serviços com ventilação natural. Essa verificação será feita a dois níveis:

- A sensação térmica global do corpo (utilizando os índices PMV e PPD e a temperatura operativa – podendo também ser utilizada para o modelo adaptativo);
- O grau de desconforto local (principalmente em relação à assimetria da temperatura radiante e correntes de ar).

Com os subtítulos que se seguem, refere-se o modo de quantificar as condições de conforto térmico global de acordo com as principais normas em vigor.

## 2.2 Índices PMV e PPD

O índice PMV pode ser utilizado para avaliar o conforto térmico de um determinado espaço físico e o índice PPD estabelece uma previsão quantitativa da percentagem de pessoas, expostas a uma dada combinação de variáveis (sob condições ambientes controladas), que consideram um determinado ambiente desconfortável, utiliza as investigações realizadas por Povl Ole Fanger nos anos 70. A equação geral de conforto térmico desenvolvida por Fanger relaciona as seguintes variáveis:

$I_{cl}$	Resistência térmica do vestuário [ <i>clo</i> ]	(Função do vestuário)
$f_{cl}$	Factor de área vestida	
$H$	Calor metabólico [ $W/m^2$ ]	(Função da atividade física)
$M$	Taxa de metabolismo [ <i>met</i> ]	
$T_a$	Temperatura do ar [ $^{\circ}C$ ]	(Parâmetros ambientais)
$T_{mr}$	Temperatura média radiante [ $^{\circ}C$ ]	
$v_a$	Velocidade relativa do ar [ $m/s$ ]	
$p_a$	Pressão parcial de vapor de água [ $kPa$ ]	

Os índices térmicos analíticos PMV e PPD constituem desde 1984 a base da Norma Europeia EN ISO 7 730:2005 [14] e, actualmente, também são considerados na Norma americana ASHRAE 55:2010 [15] e na Norma Europeia EN 15 251: 2007 [16].

## 2.3 Temperatura Operativa

O conceito de temperatura operativa (Top) é outra forma de avaliar o conforto térmico, resultou do reconhecimento da importância da radiação térmica do contorno nas condições de conforto. A temperatura operativa (Operative Temperature) é definida como uma “temperatura resultante”, que engloba simultaneamente os efeitos de três variáveis que influenciam o conforto: temperatura do ar (tar), temperatura média radiante (t<sub>mr</sub>) e velocidade do ar (var). Desta definição, resulta para a temperatura operativa [14]:

$$T_{op} = \frac{t_{ar} \cdot \sqrt{10 \cdot v_{ar}} + t_{mr}}{1 + \sqrt{10 \cdot v_{ar}}} \quad (1)$$

Nos ambientes interiores em que a velocidade do ar seja inferior a 0,2 m/s ou a diferença entre a temperatura média radiante e a temperatura do ar seja inferior a 4  $^{\circ}C$  a temperatura operativa pode ser calculada, com aproximação suficiente, através da média da temperatura do ar e da temperatura média radiante [14].

A temperatura operativa é considerada na Norma Europeia EN ISO 7 730:2005 [14] na Norma americana ASHRAE 55:2010 [15] e na Norma Europeia EN 15 251: 2007 [16]. A norma ASHRAE 55:2010 [15] propõe um método gráfico simplificado, representado na figura 1, para avaliar as condições de conforto térmico, que considera a temperatura operativa e a humidade absoluta, aplicável a ambientes com velocidades do ar inferiores a 0,2 m/s, em que as atividades dos ocupantes são sobretudo sedentárias (1,0 a 1,3 met) e estes utilizam vestuário com resistência térmica compreendida entre 0,5 e 1,0 clo, respetivamente, para a situação de verão e de inverno.

Para espaços condicionados naturalmente (sem sistemas de climatização) onde os seus ocupantes podem livremente adaptar o seu vestuário às condições ambientes interiores ou exteriores, a norma ASHRAE 55:2010 [15] também prevê o modelo adaptativo, com base no modelo adaptativo desenvolvido por De Dear [17] que considera a gama de temperatura operativa aceitável representada na figura 1 em função da temperatura média mensal do ar exterior. O modelo adaptativo aborda a questão do conforto térmico no interior dos edifícios em regime dinâmico no qual o ocupante pode interagir física e psicologicamente com o ambiente térmico que o rodeia.

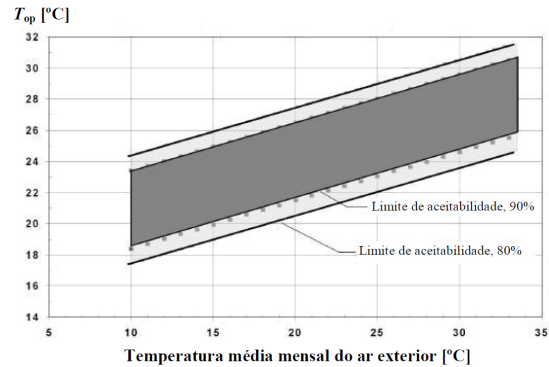
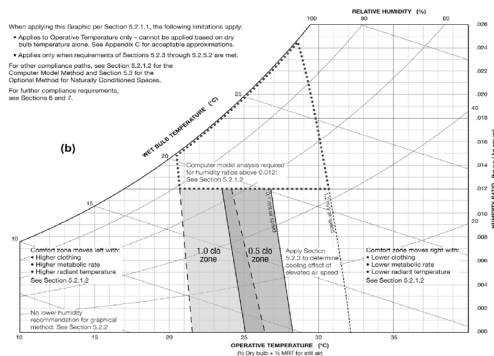


Figura 1: À esquerda: método gráfico de avaliação do conforto térmico em função da temperatura operativa e a humidade absoluta. À direita: modelo de conforto térmico adaptativo, retirados de [15]

### 3. ESTUDO DE CAMPO

#### 3.1 Descrição dos espaços analisados e medições efectuadas

O estudo de campo designado por “Campanha de Verão 2012” foi realizado numa sala de aulas (sala 16) e num gabinete da Escola Superior de Tecnologia Gestão de Viseu, figura 2. Os edifícios onde estão localizados os espaços em estudo foram construídos nos anos 90 (orientação principal SE/NW), com paredes exteriores duplas com isolamento térmico na caixa-de-ar e coberturas planas com isolamento térmico sobre a tela de impermeabilização, sendo a ventilação natural a principal ventilação dos espaços interiores. Na figura 3, é apresentada parte da fachada SW do edifício onde está localizada a sala de aulas monitorizada. Durante o período em estudo os referidos espaços não tiveram qualquer tipo de ocupação. Na tabela 1 faz-se uma caracterização geral desses espaços.

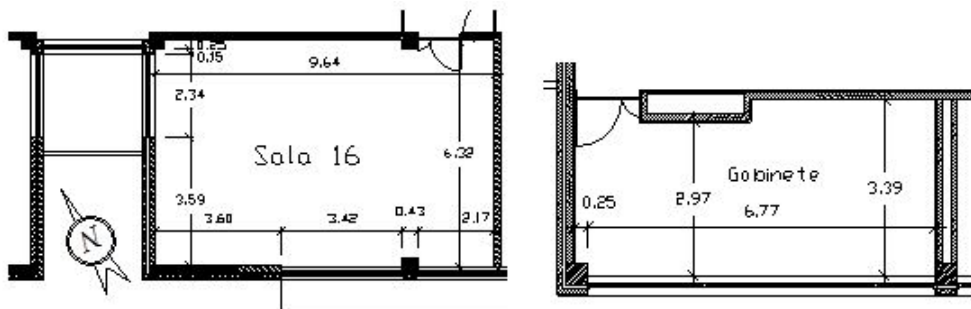


Figura 2: Planta dos espaços monitorizados, à esquerda a sala de aulas e à direita o gabinete

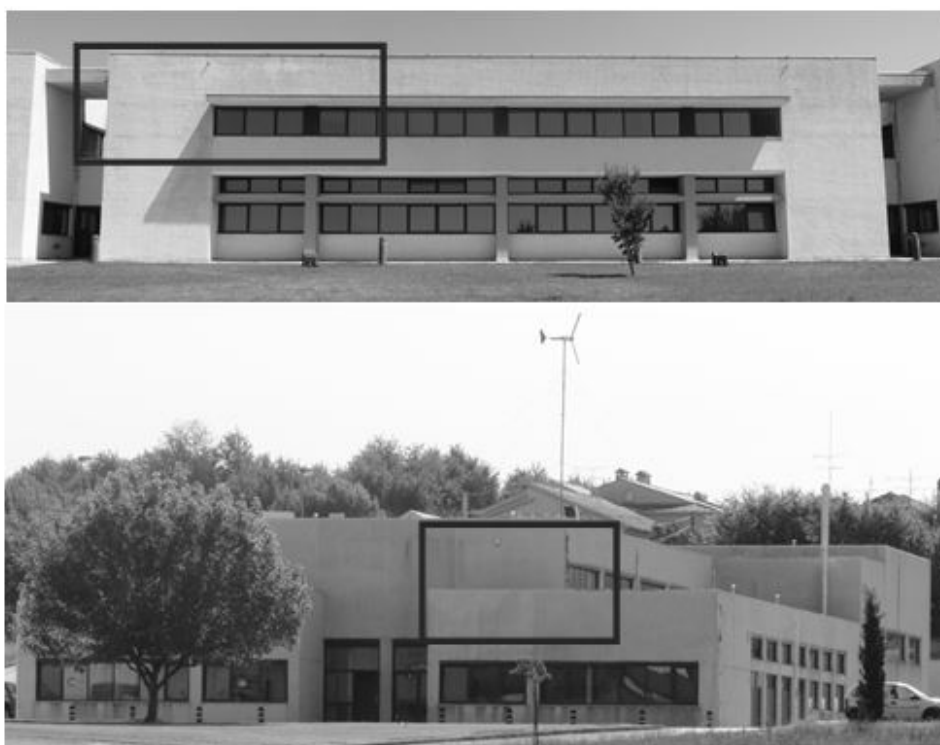


Figura 3: Localização da sala de aulas, em cima e localização do gabinete, em baixo

Tabela 1 - Características gerais dos espaços em estudo

	Sala de Aulas (Sala 16)	Gabinete
Piso	2.º	2.º
Área	61,10 m <sup>2</sup>	22,80 m <sup>2</sup>
Profundidade	6,37 m	3,40 m
Pé direito	3,20 m	3,10 m
Vãos Envidraçados	3	1
Tipo de Vidro	Duplo (6 + 10 + 4 mm)	Duplo (6 + 10 + 4 mm)
Caixilharia	Alumínio	Alumínio
Orientação	SW (210º) - 4,04 m <sup>2</sup> (7 %)	SW (210º) - 8,80 m <sup>2</sup> (35 %)
	SW (210º) - 2,56 m <sup>2</sup> (4 %)	-
	NW (300º) - 3,45 m <sup>2</sup> (5,6 %)	-
Proteção Solar	SW (210º) - estores venezianos int.	SW (210º) - estores venezianos int.
Sombreamento	SW (210º) - pala horizontal	-
	SW (210º) - pala horizontal	-
	NW - Edifício	-

Durante esta campanha de medições foram registados os parâmetros ambientais exteriores necessários para a elaboração do ficheiro climático e para obter a temperatura média mensal e a temperatura média ponderada dos 7 dias anteriores, nomeadamente, a temperatura do ar, a temperatura de ponto de orvalho, a humidade relativa, a velocidade e direção do vento, a radiação solar global em superfície horizontal e a pressão atmosférica, para esse efeito foi utilizada uma sonda “Hobo” de temperatura e humidade, uma estação meteorológica “La Crosse” e um piranómetro ligado a um Data-Logger.

Foram registados parâmetros do ambiente interior, com intervalos de 3 minutos, utilizado o seguinte equipamento de medição, figura 4: a) sondas “Hobo” (temperaturas do ar e humidade relativa); b) estação “Babuc” (temperaturas do ar, temperatura do globo, humidade relativa, velocidade do ar, radiação interior, assimetria radiante) - alinhado com o centro do vão afastado 1,20 m; c) “Fluke” (temperaturas do ar, humidade relativa, velocidade do ar, CO<sub>2</sub>) - alinhado com o centro do vão afastado 1,20 m, d) fluxímetros (fluxo de calor) e e) termopares (temperatura superficial).



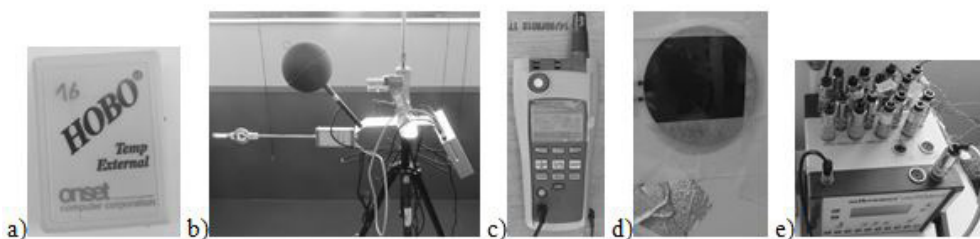


Figura 4: Equipamento de medição e de registo de parâmetros ambientais

Durante a campanha de medições foram consideradas várias condições referentes à proteção dos vãos envidraçados, utilização dos estores venezianos interiores, e à circulação do ar interior, recorrendo à abertura dos vãos envidraçados e à utilização de ventoinhas. Segue-se a apresentação de alguns resultados preliminares referentes ao 1.º período de medições, de 27 de julho a 03 de agosto de 2012, considerando os vãos envidraçados com os estores venezianos interiores inactivos e a ventilação da sala deve-se exclusivamente às infiltrações (vãos envidraçados e porta interior fechados).

### 3.1 Ambiente interior – Resultados preliminares

#### 3.2.1 Ambiente interior na sala de aulas

Na figura 5, à esquerda, são apresentados os valores da temperatura e da velocidade do ar medidos na sala de aulas e à direita a distribuição probabilística da temperatura do ar e da temperatura operativa registada a 1,20 m do vão envidraçado (Fluke). Como se pode ver na figura 5, para a situação dos vãos envidraçados e porta interior fechados, apesar da porta divisória ter uma grelha com 33,7 x 54,0 cm, a velocidade do ar é muito baixa, tendo-se obtido para o decaimento do gás traçador uma taxa de renovação de 0,11 h-1. Na tabela 2 é apresentada a análise estatística dos registos das temperaturas e da velocidade do ar da na sala de aulas.

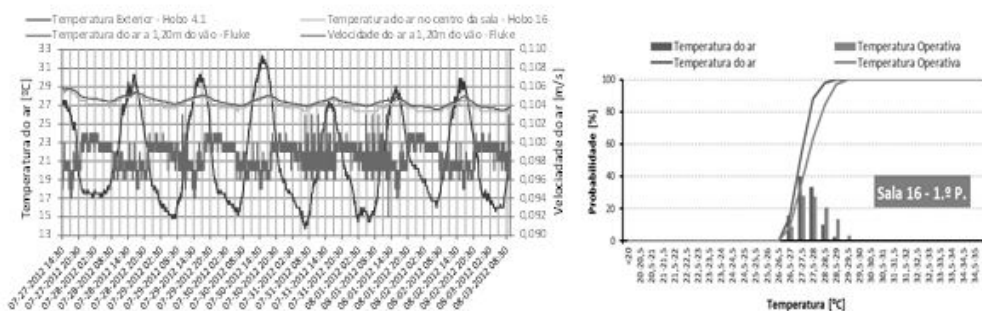


Figura 5: Temperaturas exterior e interiores, velocidade do ar e distribuição probabilística da temperatura do ar e da temperatura operativa na sala de aulas

Tabela 2 – Análise estatística da variação das temperaturas e da velocidade do ar na sala de aulas

	Temp. Ext. [°C] Hobo 4.1	Temp. Int. [°C] Hobo 16 – centro	Temp. Int. [°C] Fluke – 1,20 m	Temp. Operativa [°C] Fluke – 1,20 m	Velocidade do ar [m/s] Fluke – 1,20 m
Média	21,33	27,12	27,45	27,84	0,098
Máxima	32,34	28,70	28,90	29,50	0,103
Mínima	13,70	26,34	26,50	26,77	0,090
Des.Padrão	4,83	0,54	0,49	0,66	0,002

3.2.2 Ambiente interior no gabinete

Na figura 6, à esquerda, são apresentados os valores da temperatura do ar medidos no gabinete e, à direita, a distribuição probabilística da temperatura do ar e da temperatura operativa registada a 1,20 m do vão envidraçado (Babuc). A ventilação do gabinete deve-se exclusivamente às infiltrações, a porta divisória não possui grelha, o anemómetro do Babuc registou uma velocidade do ar igual a 0 m/s, temos que ter em consideração a sua precisão entre 0 e 0,5 m/s (0,05 m/s, para temperaturas ambientais de funcionamento entre 10 e 30 °C), tendo-se obtido para o decaimento do gás traçador uma taxa de renovação de 0,05 h<sup>-1</sup>. Na tabela 3 é apresentada a análise estatística dos registos das temperaturas e da velocidade do ar da no gabinete.

Tabela 3 – Análise estatística da variação das temperaturas e da velocidade do ar no gabinete

	Temp. Ext. [°C] Hobo 4.1	Temp. Int. [°C] Hobo 4.2 – centro	Temp. Int. [°C] Babuc – 1,20 m	Temp. Operativa [°C] Babuc – 1,20 m	Velocidade do ar [m/s] Babuc – 1,20 m
Média	21,26	28,95	29,56	29,78	0,00
Máxima	32,34	31,93	32,82	33,80	0,00
Mínima	13,70	27,12	27,64	27,60	0,00
Des.Padrão	4,83	1,33	1,37	1,60	0,00

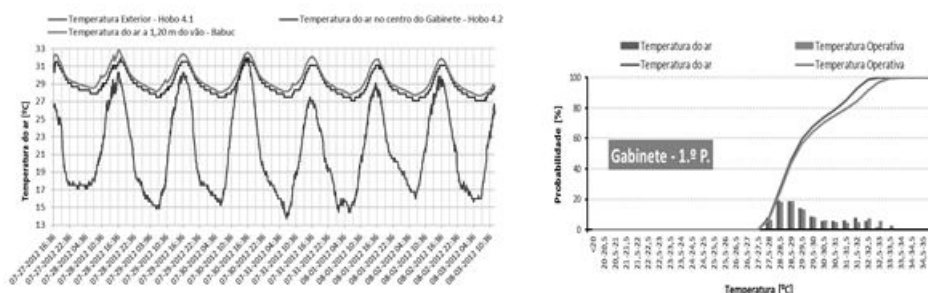


Figura 6: Temperaturas exterior e interiores, velocidade do ar e distribuição probabilística da temperatura do ar e da temperatura operativa no gabinete

3.3 Conforto térmico – Resultados preliminares

3.2.1 Conforto térmico na sala de aulas

Nas figuras 7 e 8 é apresentada a avaliação do conforto térmico na sala de aulas a 1,20 m do vão envidraçado (Fluke), de acordo com os modelos apresentados no ponto 2.

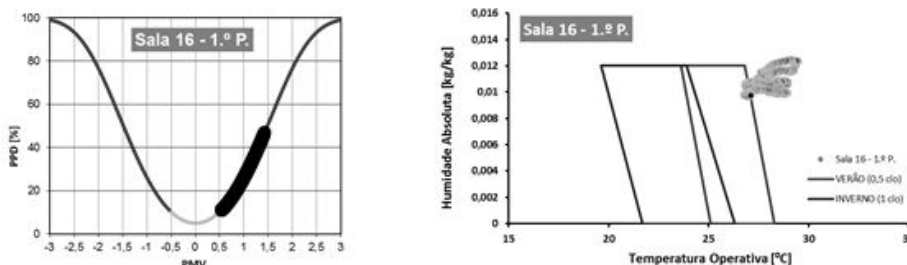


Figura 7: À esquerda o Índices PMV e PPD e à direita o Método do gráfico simplificado

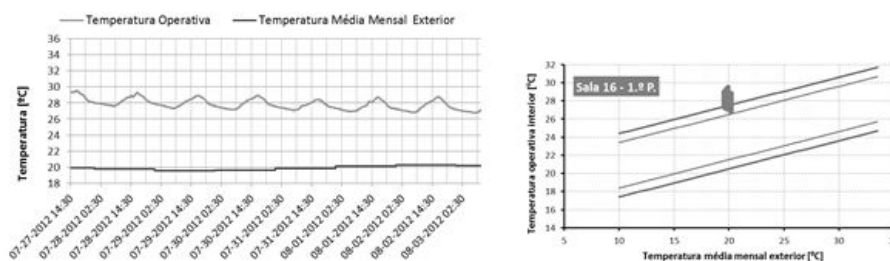


Figura 8. Avaliação do conforto térmico na sala de aulas - Modelo Adaptativo

### 3.3.2 Conforto térmico no gabinete

Nas figuras 9 e 10 é apresentada a avaliação do conforto térmico no gabinete a 1,20 m do vão envidraçado (Babuc), de acordo com os modelos apresentados no ponto 2.

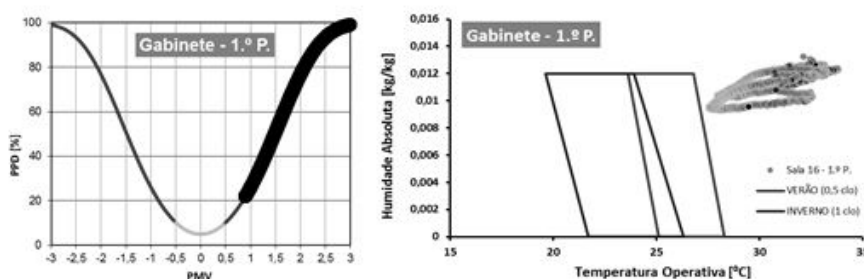


Figura 9: À esquerda o Índices PMV e PPD e à direita o Método do gráfico simplificado

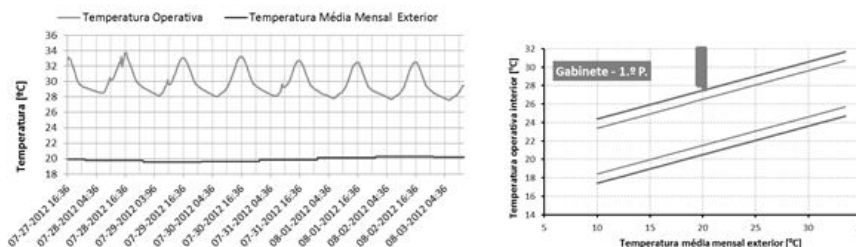


Figura 10. Avaliação do conforto térmico no gabinete - Modelo Adaptativo

### 3.4 Análise dos resultados preliminares

Em termos gerais, ao observar os resultados obtidos podemos concluir que a sala de aulas apresenta melhores condições de conforto térmico, mesmo assim longe das condições ideais, podendo ser resultantes, da existência de elementos de sombreamento, da percentagem de envidraçados, da profundidade da sala e da existência de uma grelha de ventilação. Em ambos os espaços os valores da temperatura do ar (máximos, médios e mínimos) registado a 1,20 m do vão envidraçado são superiores aos registados no centro dos respetivos espaços, sendo essa diferença mais acentuado no gabinete, apesar da distância entre os dois pontos de aquisição de dados ser inferior a 0,50 m.

Ao observar as figuras 5 e 6 podemos verificar que os valores obtidos para a temperatura operativa são superior aos valores registados para a temperatura do ar. Ao observar os resultados obtidos podemos também concluir que durante o período de monitorização os valores da temperatura operativa foram sempre superiores aos valores da temperatura média mensal exterior, sendo essa diferença mais acentuado no gabinete, que indicia que os utilizadores não terão condições de conforto sem tomar medidas em relação à sua adaptação, dentro das possibilidades, nomeadamente, a utilização de estores, a aberturas dos vãos envidraçados e da porta interior, a utilização de ventoinhas e a utilização de vestuário mais leve.

Podemos observar que na sala de aulas para o índice PMV foram obtidos valores entre 0,5 e 1,5, indicando um ambiente interior ligeiramente quente. Já em relação ao gabinete foram obtidos valores para o índice PMV entre 1,0 e 3,5 indicando que durante alguns períodos o gabinete apresenta um ambiente interior muito quente, sendo até mesmo humanamente impossível de utilizar.

Em relação aos valores registados para a velocidade do ar os resultados obtidos para o gabinete podem não ser conclusivos, visto que o anemómetro do “Babuc” registou quase sempre 0 m/s, o que indicia que a velocidade do ar é inferior a 0,05 m/s, tendo em consideração a sua precisão. Já os valores obtidos para a sala de aulas apresentam uma velocidade média do ar de 0,098 m/s, sendo um valor baixo mas aceitável.

#### 4. CONCLUSÕES

Com este artigo pretendeu-se apresentar algumas das medições efectuadas numa sala de aulas e num gabinete, tendo em consideração o estudo que se pretende realizar em relação ao conforto térmico dos ocupantes nas zonas próximas dos vãos envidraçados. Neste momento está-se a fazer o tratamento dos dados obtidos na campanha de verão. Visto que foram obtidos muitos dados, esse tratamento será demorado. No final pretende-se fazer a comparação entre todas as condições ensaiadas. Outro trabalho que está a ser executado é a modelação dos espaços medidos, pretendendo-se fazer a sua validação com as medições efectuadas.

Em relação aos valores obtidos durante este período de monitorização podemos concluir que é necessário utilizar dispositivos de sombreamento nos vãos envidraçados, tendo em consideração a sua orientação, e é importante colocar dispositivos que permitam uma adequada ventilação dos espaços, por forma a garantir a sensação de neutralidade térmica.

#### 5. REFERÊNCIAS

- [1] INE, I.P./DGEG, *Inquérito ao Consumo de Energia no Sector Doméstico 2010*, Lisboa Portugal, 2011.
- [2] Matias, L., *Desenvolvimento de um Modelo Adaptativo para Definição das Condições de Conforto Térmico em Portugal*. Dissertação de Doutoramento, Instituto Superior Técnico, 2010.
- [3] Bessoudo, M. et al, *Simulation of Thermal Comfort conditions in Highly Glazed Perimeter Zones with Shading Devices*. 2nd Canadian Solar Buildings Conference, Calgary, June 10-14, 2007.
- [4] Bessoudo, M. et al, *Indoor thermal environmental conditions near glazed facades with shading devices, Part I: Experiments and building thermal model*. *Building and environment*, 2010, Volume 45, pp. 2506-1506.
- [5] Tzempelikos, A. et al, *Indoor thermal environmental conditions near glazed facades with shading devices e Part II: Thermal comfort simulation and impact of glazing and shading properties*. *Building and environment*, 2010, Volume 45, pp. 2517-1525.
- [6] Tzempelikos, A. et al, *The impact of shading on thermal comfort conditions in perimeter zones with glass facades*. 2nd PALENC Conference and 28th AIVC Conference on Building Low Energy Cooling and Advanced Ventilation Technologies in the 21st Century, September 2007, Greece.
- [7] La Gennusa, M et al, *A model for managing and evaluating solar radiation for indoor thermal comfort*. *Solar Energy*, 2007, Volume 81, pp. 594-606.
- [8] Huizenga, C. et al, *Windows Performance for Human Comfort - Final Report to National Fenestration Rating Council*. Center for the Built Environment, Universidade da Califórnia, Berkeley, 2006.
- [9] Serra, V. et al, *Experimental evaluation of a climate façade: Energy efficiency and thermal comfort performance*. *Energy and Buildings*, 2010, Volume 42, pp. 50-62.
- [10] Poirazis, H., *Single and Double Skin Glazed Office Buildings: Analyses of Energy Use and Indoor Climate*. Dissertação de Doutoramento, Lund University, Suécia, 2008.
- [11] Singh, M. et al, *Different glazing systems and their impact on human thermal comfort - Indian scenario*. *Building and Environment*, 2008, Volume 43, pp. 1596-1602.



- [12] Almeida, R., Freitas, V., *Evaluation and Parametric Optimization of the Heating Load and Comfort Conditions in a School Building*. Proceedings of the 9th Nordic Symposium on Building Physics in the Nordic Countries. Tampere, Finland 29 de maio a 2 junho, 2011.
- [13] L. D. Augusto, L. *et al*, *Numerical Method for Calculating View Factor Between Two Surfaces*. Proceedings: Building Simulation, 2007, pp. 269-274.
- [14] EN ISO 7 730, *Ergonomics of the Thermal Environment. Analytical Determination and Interpretation of Thermal Comfort using Calculation of the PMV and PPD Indices and Local Thermal Comfort Criteria*. International Organization for Standardization, Geneva, 2005.
- [15] ANSI/ASHRAE Standard 55, *Thermal Environmental Conditions for Human Occupancy*, American Society of Heating, Refrigeration and Air-Conditioning Engineers, Atlanta, USA, 2010.
- [16] EN 15 251, *Indoor Environmental Input Parameters for Design and Assessment of Energy Performance of Buildings. Addressing Indoor Air Quality, Thermal Environment, Lighting and Acoustic*. European Committee for Standardization (CEN), Brussels, Belgium, 2007.
- [17] De Dear R. *et al*, *Developing an Adaptive Model of Thermal Comfort and Preference. Final Report*, ASHRAE RP-884, 1997.

**ANTÓNIO OLIVEIRA**

Prof.º Eng.º Civil

ESTGV / IPV

DEC

LICENCIADO EM ENG.º CIVIL

MESTRE EM CONS. EDIFÍCIOS

**HELENA CORVACHO**

Prof.ª Doutora Eng.ª Civil

FEUP

DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA  
CIVIL

SECÇÃO DE CONSTRUÇÕES CIVIS

LAB. DE FÍSICA DAS CONSTRUÇÕES

---

# PUNÇOAMENTO EM LAJES DE BETÃO COM FIBRAS DE AÇO

**N. D. GOUVEIA**

Eng.º Civil

FCT - UNL

Lisboa

nunodinarte@gmail.com

**D. M. V. FARIA**

Dr. Eng.º Civil

Ecole Polytechnique

Fédérale de Lausanne

Suíça

duamvf@gmail.com

**A. M. P. RAMOS**

Prof.º Eng.º Civil

FCT - UNL

Lisboa

ampr@fct.unl.pt

## SUMÁRIO

O uso de betão reforçado com fibras de aço (BRFA), em ligações pilar-lajes fungiformes, proporciona um aumento na capacidade de carga e de ductilidade da ligação. Neste estudo, ensaiaram-se seis modelos de laje, sujeitas a uma carga concentrada, variando-se a percentagem de incorporação de fibras de aço na matriz de betão. Os resultados mostraram que a incorporação de fibras de aço no betão influencia a rigidez, a capacidade de carga e a ductilidade das lajes.

## ABSTRACT

The use of steel fibres reinforced concrete (SFRC) in flat slab-column connections can provide an increased load capacity and ductility of slabs. In this study, tests were performed in six specimens subjected to a concentrated load, varying the percentage of incorporation of steel fibres in the concrete matrix. Results showed that incorporation of steel fibres in concrete influences the stiffness, load capacity and ductility of slabs.

## 1. INTRODUÇÃO

Nas últimas décadas tem existido um crescente interesse no BRFA, devido à sua maior eficácia na melhoria do comportamento à tracção do betão. Alguns trabalhos experimentais foram desenvolvidos relativamente ao estudo do comportamento de ligações pilar-lajes fungiformes sob carga monotónica, realizadas em betão reforçado com fibras [1-7]. Os resultados mostram que a presença de fibras no betão tem um efeito significativo no aumento da capacidade de carga e ductilidade das lajes.

A presença de fibras de aço no betão faz com que estas liguem as faces da fenda após a matriz ter fendilhado, permitindo assim, a transmissão de tensões, aumentando consequentemente a tenacidade do betão. Na maior parte dos trabalhos referidos anteriormente, o betão é caracterizado exclusivamente pela sua resistência à compressão. Em trabalhos anteriores [8-9], foi observado que a resistência à compressão e o comportamento à tracção do betão são de grande importância na capacidade de carga das ligações laje-pilar.

No presente estudo, são apresentados resultados de ensaios a lajes sujeitas a uma carga concentrada, que pretendem simular a ligação pilar-lajes fungiformes. O betão utilizado nos modelos foi caracterizado em relação à sua resistência e comportamento à compressão e à tracção. Os resultados experimentais obtidos são comparados com as previsões do MC2010 [10] e CSCT [11].

## 2. PROGRAMA EXPERIMENTAL

### 2.1 Caracterização dos Materiais

#### 2.1.1 Betão

##### 2.1.1.1 Composição do betão

A composição do betão foi semelhante em todas as misturas, variando apenas a percentagem de incorporação de fibras e a adição de adjuvante. A matriz de betão é composta por 450 kg/m<sup>3</sup> de cimento CEM II/B-L 32.5 N, 185 kg/m<sup>3</sup> de areia fina 0/2, 545 kg/m<sup>3</sup> de areia grossa 2/4, 882 kg/m<sup>3</sup> de agregado calcário 0/12.5 e 216 kg/m<sup>3</sup> de água. As fibras utilizadas foram metálicas com ganchos nas extremidades da marca Bekaert's (DRAMIX® RC 65/35 BN). O adjuvante utilizado foi *POZZOLITH* 540. Realizaram-se seis misturas de BRFA, identificando-as de M0 a M5. A mistura base (matriz de betão) M0, não teve incorporação de fibras nem de adjuvante. As misturas M1 e M2 tiveram uma percentagem de incorporação de fibras de 0.50% e 0.75%, respectivamente, não sendo adicionado adjuvante nas misturas. Nas misturas M3, M4 e M5 foram incorporadas percentagens de 0.75%, 1.00% e 1.25%, respectivamente, sendo adicionado 3.0 kg/m<sup>3</sup> de adjuvante.

##### 2.1.1.2 Resistência à compressão e à tracção do betão

Foram realizados ensaios à compressão e à tracção por compressão diametral (ensaio brasileiro). A medição da resistência à compressão foi realizada em cubos com 150 mm de aresta ( $f_{ccm}$ ) sendo considerado que a resistência média à compressão em cilindros ( $f_{cm}$ ) é de  $0.80 \cdot f_{ccm}$ . Os ensaios de tracção por compressão diametral foram realizados em cilindros com 150 mm de diâmetro e 300 mm de comprimento. Todas as amostras de betão das várias misturas foram ensaiadas aos 21 dias de idade. Na Tabela 1 são apresentadas as resistências médias à compressão ( $f_{cm}$ ) e à tracção em splitting ( $f_{ctm,sp}$ ) do betão de cada mistura.

Por observação da Tabela 1, verifica-se que, quando se compara a mistura M0 (sem fibras) com a M1 e M2 (BRFA), existe um decréscimo da resistência à compressão acompanhando de um ligeiro aumento da resistência à tracção no BRFA. Comparando a mistura M2 (sem plastificante) e a M3 (com plastificante), que têm a mesma percentagem de fibras, verifica-se que a adição de plastificante (M3) tornou o betão mais denso e mais compacto, aumentando ainda as suas resistências mecânicas.

Tabela 1 - Propriedades mecânicas do betão.

Mistura	M0 (-)	M1 (0.50%)	M2 (0.75%)	M3 (0.75%)	M4 (1.00%)	M5 (1.25%)
$f_{cm}$ (MPa)	35.9	33.8	31.8	46.2	45.8	44.5
$f_{ctm,sp}$ (MPa)	3.41	3.43	3.48	4.25	5.09	5.44

2.1.1.3 Comportamento à tracção do betão

De entre os vários métodos, directos ou indirectos, que podem ser utilizados para se obter o comportamento à tracção do BRFA, optou-se pelo ensaio de vigas com 600x150x150 mm com um entalhe a meio vão com 25 mm de profundidade, apoiadas em dois pontos e sujeitas a um carregamento pontual entre os dois apoios. A abertura de fenda foi medida utilizando dois LVDT's posicionados em ambos os lados da fenda a meio vão. Na Figura 1 é apresentado um esquema (Figura 1 (a)) e uma foto (Figura 1 (b)) do ensaio às vigas entalhadas. Foram realizadas e ensaiadas seis vigas entalhadas para cada mistura. Na Tabela 2 são apresentadas as resistências residuais médias à tracção por flexão, para duas aberturas de fenda, para cada mistura. Dos resultados apresentados na Tabela 2, verifica-se que existe, de uma forma geral, a tendência de a resistência residual média por flexão aumentar com o aumento da percentagem de fibras adicionadas ao betão, para as aberturas de fendas (CMOD<sub>1</sub> e CMOD<sub>3</sub>) consideradas.

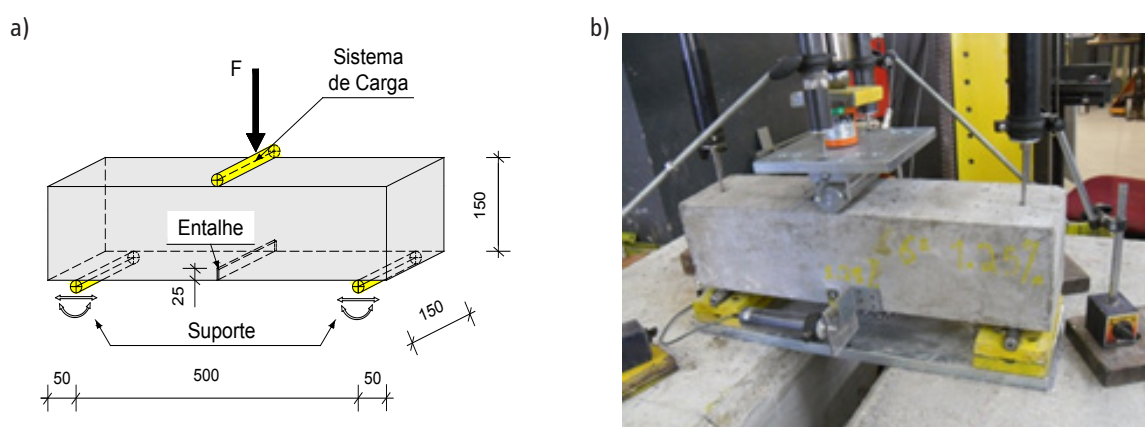


Figura 1: Vigas entalhadas: a) esquema (dimensões em mm) e b) realização de ensaio.

Tabela 2: Resistência residual média à tracção por flexão para cada mistura de betão.

Mistura	M0 (-)	M1 (0.50%)	M2 (0.75%)	M3 (0.75%)	M4 (1.00%)	M5 (1.25%)
$f_{R1}$ (MPa) CMOD <sub>1</sub> =0.5mm	-	3.68	4.54	6.97	6.93	9.60
$f_{R3}$ (MPa) CMOD <sub>3</sub> =2.5mm	-	3.72	5.35	4.99	6.58	9.24

### 2.1.2 Aço da Armadura Ordinária

A armadura superior dos modelos era constituída por vinte e um varões de 10 mm de diâmetro em cada direcção, o que corresponde aproximadamente a uma malha quadrada de  $\phi 10//0.075$  m. Com o objectivo de evitar a fendilhação dos modelos no seu transporte até ao local do ensaio, colocou-se uma armadura longitudinal inferior, constituída por oito varões de 6 mm de diâmetro em cada direcção, o que corresponde aproximadamente a malha quadrada de  $\phi 6//0.20$  m. O espaçamento dos varões de 6 mm foi diferente junto ao pilar para evitar a influência que estes varões possam ter nas fases de rotura e pós-rotura por punçoamento. Na Figura 2 estão esquematizadas as disposições das armaduras longitudinais dos modelos.

Para caracterização mecânica do aço da armadura ordinária, foram realizados ensaios de tracção a três provetes por cada diâmetro do aço utilizado como armadura longitudinal dos modelos.

Na Tabela 3 apresentam-se os valores médios da tensão de cedência à tracção, no caso dos varões com 10 mm de diâmetro ( $f_y$ ) e da tensão limite convencional de proporcionalidade a 0.2% à tracção no caso dos varões com 6 mm de diâmetro ( $f_{0.2}$ ). São também indicados os valores médios da tensão de rotura à tracção do aço ( $f_t$ ).

Durante a elaboração de cada modelo foi feito um levantamento altimétrico das armaduras longitudinais superiores, permitindo a determinação da sua altura útil média ( $d$ ), obtendo-se 105 mm como valor médio em todos os modelos. A percentagem de armadura longitudinal superior ( $\rho$ ) para todos os modelos foi de 1.00%.

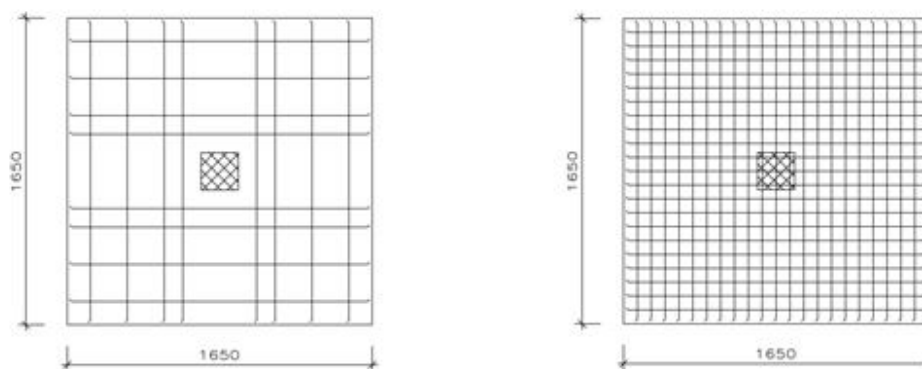


Figura 2: Esquema da disposição da armadura longitudinal inferior e superior (dimensões em mm).

Tabela 3 - Caracterização do aço da armadura longitudinal dos modelos de laje.

Diâmetro do Varão (mm)	Tipo	Valor médio de $f_y$ ou $f_{0.2}$ <sup>(1)</sup> (MPa)	Valor médio de $f_t$ <sup>(2)</sup> (MPa)
6	ER	594	724
10	NR	523	607

(1) tensão de cedência ou tensão limite convencional de proporcionalidade a 0.2% à tracção do aço;

(2) tensão de rotura à tracção do aço.

### 2.1.3 Fibras de Aço

A fibra de aço utilizada nos modelos foi a Dramix® RC 65/35 BN (Figura 3). Esta é uma fibra de aço com extremos dobrados para melhor ancoragem, com comprimento total igual a 35 mm, com diâmetro de 0.55 mm, com uma esbelteza 64 e com tensão de cedência de cerca de 1150 MPa.



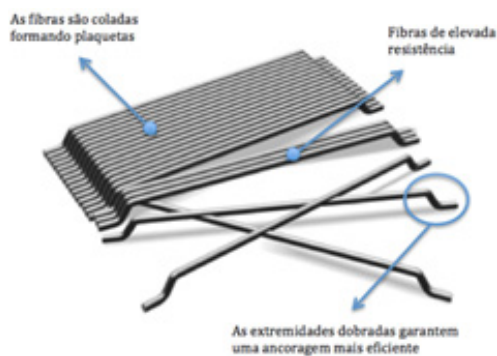


Figura 3: Apresentação das fibras de aço Dramix® RC 65/35 BN utilizada nos modelos.

## 2.2 Descrição dos Modelos de Laje

Foram ensaiados cinco modelos de lajes em betão com fibras e ainda um ensaio a um modelo padrão (sem fibras) para comparação. Estes modelos pretendiam simular a zona junto ao pilar, limitada pelas linhas de inflexão, onde os momentos são nulos. Os modelos ensaiados consistiam em painéis de laje quadrados, com dimensões em planta de 1650x1650 mm e 125 mm de espessura. O pilar central foi simulado por uma placa de aço com dimensões de 200x200 mm e com 50 mm de espessura, possuindo assim rigidez suficiente para manter a superfície de contacto plana ao longo do ensaio. A laje estava apoiada em oito pontos através de vigas de distribuição e quatro cordões de pré-esforço, que ligavam o modelo à laje de reacção do laboratório. A carga foi introduzida no centro da laje, na superfície inferior através da placa de aço, accionada por um macaco hidráulico, controlando-se a velocidade de aplicação da pressão/carga. Na Figura 4 é apresentada uma foto de um modelo de laje pronto a ser ensaiado e um esquema em corte da geometria do ensaio.

a)



b)

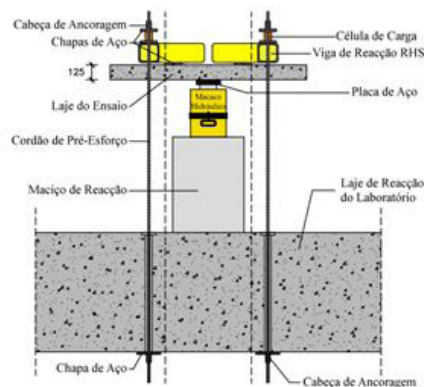


Figura 4: a) foto de um modelo de laje a ser ensaiado e b) esquema em corte da geometria do ensaio.

O modelo de laje padrão foi designado como ND0, sendo composto pelo mesmo betão da mistura M0, descrita anteriormente. Os modelos com incorporação de fibras foram designados por ND1, ND2, ND3, ND4 e ND5, sendo compostos pelo betão das misturas M1, M2, M3, M4, M5, respectivamente, descritas anteriormente.

Os ensaios foram semelhantes em todos os modelos, realizados aos 21 dias de idade. O carregamento monotónico foi aplicado a uma velocidade constante de 285 N/s, tendo-se procedido a leituras com um intervalo de um segundo, de todas as grandezas instrumentadas.

### 2.3 Instrumentação dos Modelos de Laje

Em cada ensaio realizado procedeu-se à monitorização da carga vertical aplicada, da deformação do modelo e das extensões em alguns dos varões das armaduras longitudinais superiores. Quatro células de carga, onze transdutores eléctricos e oito extensómetros eléctricos, foram utilizados a fim de medir cargas aplicadas, deformações da laje e extensões da armadura longitudinal superior, respectivamente. Toda a instrumentação atrás referida estava ligada a três unidades de aquisição de dados colocados em série, medindo os dados continuamente durante os ensaios. Na Figura 5 é apresentado um esquema da disposição das células de carga, dos transdutores de deslocamento e dos extensómetros utilizados nos ensaios.

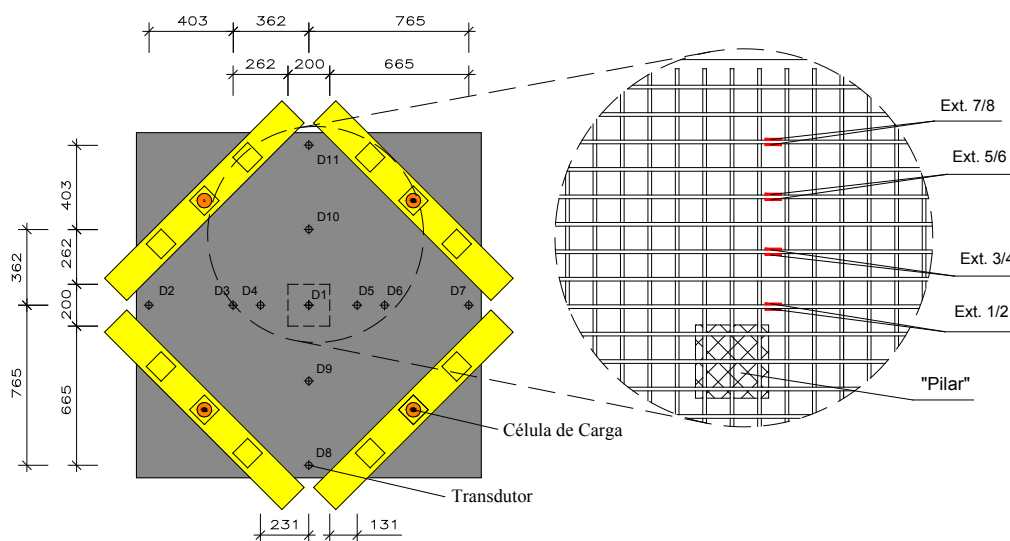


Figura 5: Disposição da monitorização.

### 3. ANÁLISE DE RESULTADOS

Na Tabela 4 é apresentada a carga de rotura ( $V_{u,exp}$ ) de cada modelo. Na Figura 6 é apresentada a evolução carga-deslocamento em todos os modelos. Os deslocamentos são apresentados como médias de pares de valores medidos pelos transdutores colocados simetricamente (transdutores D8 e D11 na Figura 5 (a)) em relação ao centro das lajes (transdutor D1 na Figura 5 (a)).

Modelo	$V_{u,exp}$ (kN)	$V_{u,exp} / V_{u,exp,ND0}$
ND0 (-)	289.2	1.00
ND1 (0.50%)	296.0	1.02
ND2 (0.75%)	369.3	1.28
ND3 (0.75%)	450.7	1.56
ND4 (1.00%)	456.0	1.58
ND5 (1.25%)	474.7	1.64

Tabela 4 – Resultados experimentais: cargas últimas.

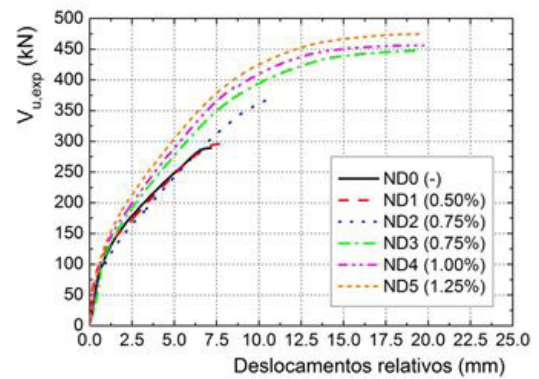


Figura 6: Carga experimental vs deslocamentos relativos dos modelos de laje.

A partir dos resultados obtidos (Tabela 4), é possível concluir que consegue-se aumentar consideravelmente a capacidade de carga da laje ( $V_{u,exp,ND0}$  é a carga máxima atingida no modelo NDO), através da introdução de fibras de aço no betão, mostrando o seu efeito benéfico. Observando a Figura 6, verifica-se que com o aumento da percentagem de fibras existe um aumento da rigidez das lajes. Na carga de rotura, verifica-se um aumento dos deslocamentos máximos atingidos em todos os modelos de BRFA, quando comparado com o modelo sem fibras.

#### 4. PREVISÃO DA CAPACIDADE DE CARGA

O MC2010 [10] apresenta um capítulo dedicado ao BRFA, incluindo previsões relativamente ao punçoamento de lajes em BRFA, apresentando uma nova filosofia de dimensionamento baseada no Critical Shear Crack Theory (CSCT) descritos por Muttoni [11]. As expressões do CSCT foram aplicadas às lajes BRFA apresentadas por Muttoni e Ruiz [12] e por Maya *et al.* [13], onde mostraram que o modelo proposto por Voo e Foster [14], o Variable Engagement Model (VEM), combinado com o CSCT, permite prever a capacidade de carga das lajes, que podem ser comparadas com os resultados experimentais. Além disso, é também importante determinar se as expressões características fornecidas no MC2010 [10] fornecem estimativas no lado da segurança, ou seja, se o percentil 5% é maior do que a unidade.

Assim, no presente documento são consideradas três abordagens: (1) *MC2010*, empregando as expressões características do MC2010 [10] utilizando  $w_u = \psi \cdot d/6$  e com o modelo linear de pós-fendilhação, utilizando a respectiva resistência residual média à tracção por flexão apresentadas na Tabela 2, (2) *CSCT completo*, em que se usa o CSCT com o procedimento completo de integração e (3) *CSCT simplificado*, usando o CSCT com o procedimento simplificado de integração. Ao usar o MC2010 e o CSCT, adoptou-se o nível III de aproximação de acordo com o MC2010 [10] e Muttoni e Ruiz [12]. Na Tabela 5 são apresentadas as relações entre a carga experimental e a carga prevista de cada laje, usando as três abordagens. Utilizando essas previsões, calculou-se a média e COV da relação  $V_{u,exp} / V_{u,prev}$  de todas as lajes em BRFA e no caso do MC2010 ainda o percentil 5%.

Tabela 5 - Relação  $V_{u,exp} / V_{u,prev}$  de acordo com MC2010 [10] e CSCT [11].

$V_{u,exp} / V_{u,prev}$	MC2010 [10]	CSCT [11]	
	$w_u = \psi \cdot d / \delta$	Completo	Simplificado
ND0 <sup>(1)</sup> (-)	1.17	1.02	1.02
ND1 (0.50%)	0.90	1.04	1.04
ND2 (0.75%)	0.94	1.12	1.13
ND3 (0.75%)	1.09 <sup>(2)</sup>	1.19	1.19
ND4 (1.00%)	1.11 <sup>(2)</sup>	1.14	1.14
ND5 (1.25%)	1.15 <sup>(2)</sup>	1.15 <sup>(2)</sup>	1.15 <sup>(2)</sup>
Média	1.04	1.13	1.13
COV	0.11	0.05	0.05
Percentil 5%	0.91	-	-

(1) este modelo não foi considerado no cálculo da média, COV e percentil 5%.

(2) o modo de rotura previsto pelos cálculos é por flexão.

Todas as cargas de ruptura previstas, utilizando o modelo CSCT, são mais baixas do que os resultados experimentais obtidos, sendo portanto conservadoras. Em relação às previsões do MC2010, os resultados mostram que nem todas as relações  $V_{u,exp} / V_{u,prev}$  fornecem estimativas do lado da segurança. Mais significativo é que o percentil 5% das relações  $V_{u,exp} / V_{u,prev}$  é inferior à unidade, o que significa que MC2010 não forneceu estimativas seguras para a capacidade de carga destas lajes em BRFA.

## 5. CONCLUSÕES

Neste trabalho é apresentada uma investigação experimental sobre ligações laje/pilar em BRFA, juntamente com o estudo das suas propriedades, que são avaliadas por meio de relações de carga/CMOD obtidas nos ensaios de vigas entalhadas, onde foi observado que o comportamento pós-fissuração melhora com o aumento da percentagem de fibras no BRFA.

Os resultados mostraram que a introdução de fibras permitiu um aumento da capacidade de carga, de até 64% em relação a uma laje sem fibras e da deformação final das lajes.

Os resultados experimentais obtidos foram comparados com as previsões do MC2010 [10] e CSCT [11], mostrando o CSCT [11] boas previsões da capacidade de carga das lajes em BRFA, estando sempre do lado da segurança. O MC2010 [10] não forneceu estimativas seguras para a capacidade de carga de lajes em BRFA.

## 6. AGRADECIMENTOS

Este trabalho teve o suporte da Fundação para a Ciência e Tecnologia - Ministério da Ciência e Tecnologia e Ensino Superior através do Projecto FCT/MCTES - PTDC/ECM/114492/2009: FLAT - Comportamento de Lajes Fungiformes Sujeitas a acções cíclicas e sísmicas. Ao Engº Erik Ulrix da BIU Portugal e Engª Ann Lambrechts da BEKAERT Bélgica pelo fornecimento das fibras. À empresa SONANGIL S.A., pelo fornecimento dos agregados e do plastificante.

## 7. REFERÊNCIAS

- [1] Narayanan, R. e Darwish, I.Y.S., "Punching shear tests on steel-fibre-reinforced micro-concrete slabs". Magazine of Concrete Research, V. 39, No. 138, Março 1987, pp. 42-50.
- [2] Alexander, S. D. B. e Simmonds, S. H., "Punching Shear Tests of Concrete Slab-Column Joints Containing Fibre Reinforcement". ACI Structural Journal, Vol. 89, No. 4, 1992, pp. 425-432.
- [3] Harajli, M. H., Maalouf, D., and Khatib, H., "Effect of Fibres on the Punching Shear Strength of Slab-Column Connections". Cement & Concrete Composites, V. 17, No. 2, 1995, pp. 161-170.
- [4] Cheng, M.Y. and Parra-Montesinos, G.J., "Evaluation of Steel Fibre Reinforcement for Punching Shear Resistance in Slab-column Connections, Part I: Monotonically Increased load". ACI Structural Journal, V. 107, No. 1, Janeiro-Fevereiro 2010, pp. 101-109.
- [5] Paias, J. R. S., "Punching shear behaviour of flat slabs strengthened with steel fibres". Tese de mestrado, Faculdade de Ciências e tecnologia da Universidade Nova de Lisboa, 2829-516 Caparica Portugal, 2010.
- [6] Higashiyama, H., Ota, A., Mizukoshi, M., "Design Equation for Punching Shear Capacity of SFRC Slabs". International Journal of Concrete Structures and Materials, V. 5, No. 1, pp. 35-42, 2011.
- [7] Nguyen-Minh, L., Rovňák, M., Tran-Quoc, T., "Punching shear Capacity of Interior SFRC Slab-Column Connection". Journal of Structural Engineering, ASCE, pp. 613-624, 2012.
- [8] Mamede, N. F. S., Ramos, A. M. P. and Faria, D. M. V., "Experimental and parametric 3d nonlinear finite element analysis on punching of flat slabs with orthogonal reinforcement". Engineering Structures 48 (2013), Março 2013, pp. 442-457.
- [9] Faria, D., Biscaia, H., Lúcio, V. and Ramos, A., "Material and geometrical parameters affecting punching of reinforced concrete flat slabs with orthogonal reinforcement". In: fib Symposium, Prague; 2011.
- [10] Federation International du Beton, "Model Code 2010, Final draft", 2012.
- [11] Muttoni, A., "Punching Shear of Reinforced Concrete Slabs without Transverse Reinforcement". ACI Structural Journal, Vol. 105, No.4, Julho-Agosto 2008, pp.440-450.
- [12] Muttoni, A. and Ruiz, M. F., "MC2010: The critical shear crack theory as a mechanical model for punching shear design and its application to code provisions". In: fib Bulletin 57: shear and punching shear in RC and FRC elements. Lausanne (Suíça), 2010, pp. 31-60.
- [13] Maya, L. F., Ruiz, M. F., Muttoni, A., and Foster, S. J., "Punching shear strength of steel fibre reinforced concrete slabs". Engineering Structures 40 (2012), pp. 83-94.
- [14] Voo, J.Y.L.; Foster, S.J., "Tensile fracture of fibre reinforced concrete: variable engagement model". In : 6th Rilem symposium of fibre reinforced concrete (FRC). Varenna (Itália), 2004, pp. 75-84.





**NUNO GOUVEIA**

ENG.º CIVIL

FCT/UNL

Lisboa

nunodinarte@gmail.com



**DUARTE FARIA**

Dr. ENG.º CIVIL

Ecole Polytechnique  
Fédérale de Lausanne

Suíça

duamvf@gmail.com



**ANTÓNIO RAMOS**

PROF. ENG.º CIVIL

FCT/UNL

Lisboa

ampr@fct.unl.pt

# BETÃO AUTO-COMPACTÁVEL (BAC) - CONTRIBUTO PARA UM DESENVOLVIMENTO SUSTENTÁVEL

**PEDRO RAPOSEIRO DA SILVA**

Assistente  
ISEL/ADEC  
Lisboa

**JORGE DE BRITO**

Professor Catedrático  
IST/UTL  
Lisboa

## SUMÁRIO

O presente artigo tem como objectivo apresentar o modo como o betão auto-compactável pode contribuir para minorar o efeito da indústria da construção em termos de desenvolvimento sustentável. O efeito da indústria da construção no meio ambiente é significativo e representa um impacto ambiental que não pode ser desprezado quando se pretende abordar o tema do desenvolvimento sustentável e equilibrado do planeta com ênfase no efeito de estufa e no consumo de recursos naturais limitados. Salienta-se, no presente artigo, o modo como a utilização do betão auto-compactável (BAC) pode constituir um contributo importante no sentido de atingir um maior desenvolvimento sustentável, nomeadamente pela incorporação de quantidades significativas de subprodutos de outras indústrias ou de materiais reciclados na sua composição e pelo potencial aumento da durabilidade das estruturas que conduzirá a mais prolongados ciclos de vida.

## ABSTRACT

This paper intends to demonstrate how self-compacting concrete can contribute to reduce the effects of the construction industry in terms of sustainable development. The impact of the construction industry on the environment is significant and it can not be overlooked when analysing the issue of sustainable and balanced development of the planet with an emphasis on the greenhouse effect and the consumption of limited natural resources. This paper highlights how the use of self-compacting concrete (SCC) can be an important contribute to reach a better sustainable development, namely by incorporating significant quantities of sub-products of other industries and recycled materials in its composition, and by potentially increasing the structures durability which will lead to longer life cycles.

## 1. INTRODUÇÃO

O betão, como material de construção, é utilizado há milhares de anos. Constituído essencialmente por um material compósito de agregado grosso ligado entre si por uma pasta de ligante hidráulico, já os Romanos o usavam na construção de parte das suas estruturas, tendo inclusivamente algumas delas chegado aos dias de hoje.

Com a invenção do cimento Portland normal (CPN) na primeira metade do século XIX, e pouco depois, do betão tal como é conhecido hoje, este torna-se, nos tempos modernos, no material de construção mais importante em todo o mundo. No entanto, e apesar da popularidade da sua aplicação, o betão não deixa de estar associado a muitas das anomalias observadas nas estruturas em serviço, normalmente ligadas a problemas das amassaduras, deficiente colocação em obra ou processos de manutenção inadequados ou até mesmo inexistentes, os quais podem conduzir à deterioração permanente das estruturas e consequente perda das condições de serviço.

Com o aumento da empatia social a nível global com os problemas de sustentabilidade do Planeta, existe, neste momento, uma maior preocupação com o impacto ambiental provocado pela utilização do betão na construção, constituindo actualmente uma das principais preocupações, senão a mais importante, ao nível da indústria dos betões. Naturalmente que a procura de uma maior sustentabilidade já está (ou deveria estar) a provocar alterações significativas nos padrões de vida actuais, levando à identificação de alguns dos sectores mais “problemáticos”. Reconhecendo-se a indústria do betão como uma das maiores consumidoras de recursos materiais e energéticos, constituindo-se assim como uma das principais contribuintes para o agravamento, por exemplo, do efeito de estufa do Planeta, tem-se como consequência lógica a necessidade de, também nesta área, apresentar e testar novas soluções.

Assim, o novo desafio que se tem apresentado à indústria da construção, e já reconhecido por muitos, é o de conseguir dar respostas mais eficazes em termos da produção e da utilização de novas técnicas e materiais que possam ir ao encontro de um maior e mais apertado nível de exigências em termos ambientais, e que simultaneamente possam apresentar desempenhos superiores a custos mais acessíveis. Por outras palavras, torna-se necessário produzir betão com propriedades mecânicas excelentes em paralelo com níveis de durabilidade elevados.

## 2. TECNOLOGIA DO BETÃO VS. DESENVOLVIMENTO SUSTENTÁVEL

As melhorias a implementar quanto à tecnologia do betão para contribuir para uma real diminuição do impacto ambiental da indústria da construção terão de passar não só pela análise do seu impacto em termos da natureza, utilização e consumo das diversas matérias-primas constituintes, mas sobretudo por uma alteração do modo como é encarado pelos diversos intervenientes (do dono de obra ao empreiteiro) o próprio processo em si. Só assim será possível a implementação de novas técnicas construtivas bem como a utilização de novos materiais (e/ou combinações entre ambos) de modo a que, através da diminuição do impacto ambiental da indústria da construção, se possa contribuir para um desenvolvimento sustentável.

Desde o processo de obtenção das diversas matérias-primas até ao fim da vida útil das estruturas (com a sua demolição), todas as fases intermédias contribuem de algum modo para o referido efeito. Observando a Figura 1, é possível identificar muitos dos factores que condicionam o efeito da construção no ambiente e consequentemente num desenvolvimento sustentável mais próximo do ideal. Não é contudo possível ignorar o elevado contributo do betão nos referidos efeitos. Desde o processo de extracção dos seus componentes, à produção, à utilização e manutenção das estruturas e à reciclagem dos resíduos resultantes de demolições, o betão está presente e representa uma fatia significativa dos referidos efeitos.

Apesar de o impacto ambiental da utilização do betão não dever ser atribuído exclusivamente à utilização do cimento Portland (CP), é no entanto um dos factores mais relevantes. Refere Costa [1] que a produção anual de CP (a nível mundial) provoca aproximadamente 7% de acréscimo do total de CO<sub>2</sub> na atmosfera. Este valor é atribuível não só ao processo de fabrico / transformação do CP mas também às actividades de extracção das matérias-primas como o calcário e a argila.

Não obstante o impacto ambiental do betão não passar exclusivamente pela utilização do CP, importa mencionar o recurso a grandes quantidades de agregado tanto grosso como fino (britas e areias) que, num betão convencional, pode representar até 80% da massa do betão [2; 3]. A necessidade de tais quantidades de agregado resulta em processos de extracção, tratamento e transporte de grande escala que necessariamente consomem quantidades consideráveis de energia (essencialmente combustíveis fósseis. Referem Rodrigues et al. [4] que, até ao ano de 2010, a indústria da construção foi responsável por um consumo anual a nível mundial de aproximadamente 37.4 mil milhões de toneladas de agregados naturais e será expectável que até ao ano de 2015 os referidos consumos possam atingir cerca de 48 mil milhões de toneladas. O desenvolvimento sustentável exigida pela Humanidade nesta fase requer uma clara redução desse valor [4].

São ainda de referir as consequências que a falta de durabilidade do betão têm no seu impacte ambiental, nomeadamente pela diminuição do ciclo de vida das estruturas e provocando reparações significativas, a maioria muito antes do período previsto, considerando que o dimensionamento, para a maioria dos regulamentos estruturais, tem implícito, para situações correntes, um tempo de vida útil de 50 anos. É, no entanto, frequente o aparecimento de estruturas com sinais de deterioração apenas com 20 a 30 anos de serviço. A alteração do tempo de vida útil das estruturas para 100 ou até mesmo 150 anos traria benefícios não só na diminuição dos custos associados ao aumento do ciclo de vida (“substituir” uma determinada estrutura em ciclos de 100 ou 150 anos em vez de 50) mas também no consumo de recursos naturais. Se a tal facto se adicionar a reutilização dos produtos de demolição no ciclo produtivo, esse impacte seria ainda mais significativo [5; 6].

É reconhecido que a evolução e o esforço em termos de investigação que tem sido feito ao longo dos últimos 30 anos têm conduzido a progressos significativos tanto ao nível dos materiais constituintes do betão como da tecnologia envolvida. Passou-se claramente de uma situação em que o know-how técnico era essencialmente baseado em conhecimentos empíricos associados a ciclos de “experimentação, erro, correcção”, para uma situação em que o estudo, selecção e aplicação tanto dos materiais como das tecnologias associadas ao betão podem ser devidamente concebidos em função do conhecimento e dos requisitos dos mesmos.

Actualmente, e com ênfase em exigências de desenvolvimento mais sustentável, impõe-se uma nova abordagem relativamente à tecnologia do betão: procura de métodos de produção e de construção com consumos inferiores de energia, melhoria da durabilidade das estruturas e um maior grau de reciclagem dos desperdícios da construção ou da utilização de subprodutos de outras indústrias, nomeadamente com a sua reintrodução (reutilização) no processo construtivo, entre outros. Por outras palavras, o modo de o betão contribuir para uma construção mais sustentável passa essencialmente pela actuação em três áreas [5; 6]:

- minimização da utilização de matérias-primas (entenda-se recursos naturais) pelo aumento tanto da eficiência dos diversos componentes isoladamente como pela utilização de materiais reciclados depois de incorporados no produto final;
- maximização da durabilidade das estruturas aumentando muito a vida útil com necessidades mínimas de operações de manutenção;
- redução dos custos de manutenção não só através do aumento directo da durabilidade mas também alterando o modo como as obras são encaradas por parte dos diversos intervenientes, ou seja, a vida útil de uma estrutura não pode ser diferente em função da visão individual e particular de cada um, já que ela é efectivamente (e legalmente) a mesma para o dono de obra, o projectista, o empreiteiro ou o fiscal; no entanto, relativamente à tecnologia do betão, a diminuição dos custos de manutenção pode ser associada directamente ao aumento da durabilidade das mesmas devendo ficar os restantes factores para abordagens mais amplas sobre o tema.

Apresenta-se na Figura 2 um esquema simples sobre a abordagem referida no parágrafo anterior.

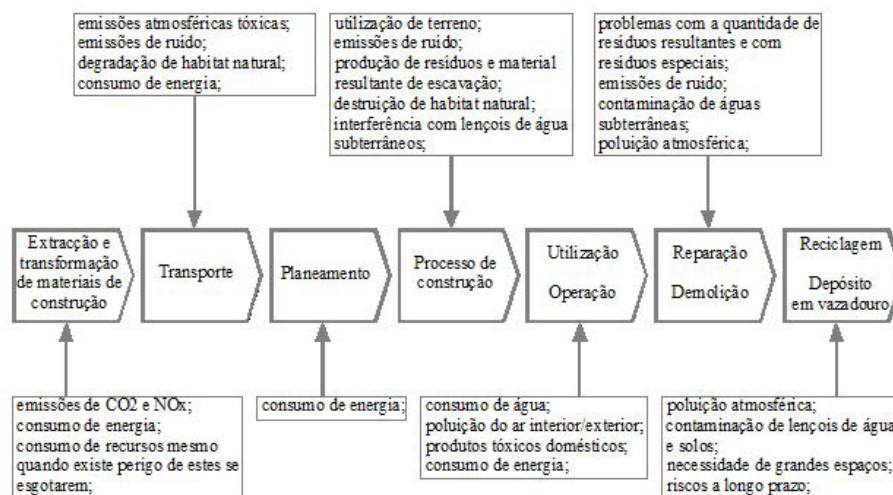


Figura 1 - Efeito da construção no meio ambiente - da construção até à demolição (adaptado de [7])

Das três vertentes consideradas relativamente à “tecnologia do betão e desenvolvimento sustentável”, verifica-se que, em termos do campo de intervenção primordial ao nível do desenvolvimento futuro, serão a utilização de betões de desempenho melhorado e a incorporação de materiais reciclados no fabrico de betões e argamassas as áreas que possuem maior potencial de melhoria com efeitos significativos.

Ao nível da preocupação com o meio ambiente e com a gestão de recursos naturais, como forma de atingir um desenvolvimento sustentável, é de salientar a criação da European Construction Technology Platform (ECTP) que tem por objectivo contribuir para a melhoria da competitividade e sustentabilidade do sector da construção na Europa.

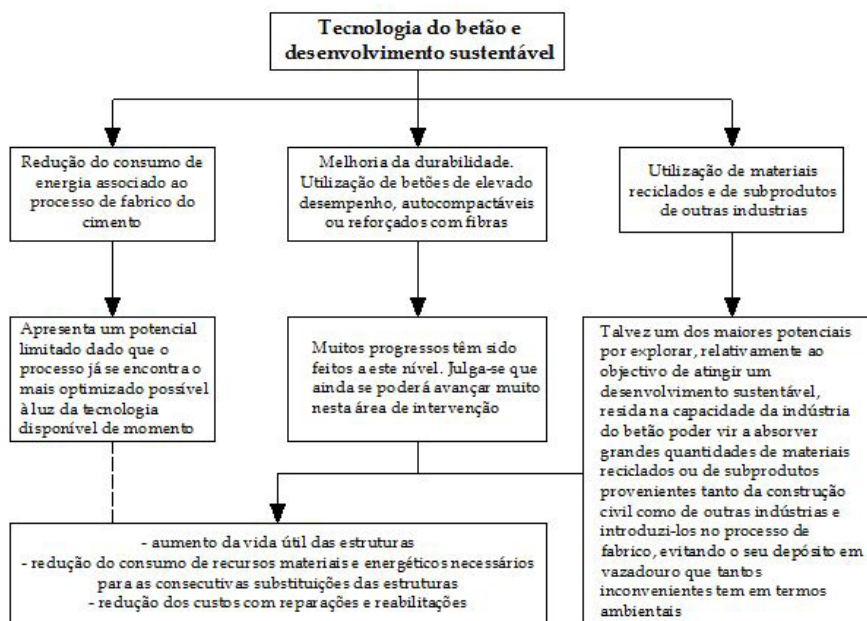


Figura 2 - Tecnologia do betão versus desenvolvimento sustentável

Através das orientações da ECTP, é possível identificar a importância dada à procura dos factores que possam contribuir para um desenvolvimento mais sustentável, procurando a mobilização dos diversos intervenientes no sector da construção, nomeadamente empreiteiros, entidades oficiais, arquitectos e engenheiros. A intervenção da ECTP consubstancia-se principalmente na promoção e incentivos à I&D no sector, sendo essencialmente dirigida para as seguintes áreas: tecnologia e materiais; indústria e transformação; serviços.

No documento *Challenging and Changing Europe's Built Environment - A vision for a sustainable and competitive construction sector by 2030*, de Fevereiro de 2005 [8], a ECTP propõe um conjunto de objectivos em termos de desenvolvimento para a Europa, que apresentam como corolário final a melhoria da qualidade de vida dos cidadãos. No mesmo documento, é reconhecido que o equilíbrio entre desenvolvimento económico e manutenção de uma sustentabilidade dos recursos naturais se constitui como o principal contributo para a melhoria da referida qualidade de vida.

Como elementos essenciais ao desenvolvimento económico, ao crescimento sustentável, bem como à qualidade de vida dos cidadãos, aparece em destaque a concepção, construção e manutenção de edifícios e infra-estruturas. Desse modo, a ECTP considera essencial o contributo que o sector da construção terá na concretização dos seus objectivos.

Considera ainda a ECTP que o modo de dar resposta aos elevados níveis de consumo de energia - só o sector da construção, na Europa, é responsável por 40% dos recursos naturais consumidos [8] - deverá passar pela possibilidade de uma maior utilização de construções do tipo modular, através da introdução de elementos pré-fabricados, materiais de construção com incorporação de produtos reciclados, utilização de novas matérias e melhoria dos próprios processos construtivos. É de referir que é actualmente expectável vir a obter uma redução de aproximadamente 30% do custo associado ao ciclo de vida das construções e uma redução de 50% dos acidentes de trabalho, unicamente com a alteração e consequente melhoria dos processos construtivos [8].

No documento *Vision 2030 & Strategic Research Agenda, Focus area Materials*, no capítulo *Need of R&D* [9] (página 14), onde é dado destaque aos BAC, incluídos no grupo dos *Composite cement-based materials*, a ECTP [9], nas orientações dadas, refere que "as metodologias para a optimização das proporções das misturas, a par da análise da viabilidade económica e sobretudo das melhorias no ambiente de trabalho e dos impactes ambientais, são aspectos a ter em conta nos próximos anos".

No que diz respeito à utilização de novos betões, tal como referido, muitos progressos têm sido feitos que têm claramente contribuído para a obtenção de betões com desempenhos insuspeitáveis há 40 ou 50 anos.



O tema (betão auto-compactável BAC) é de grande interesse actual pois, apesar de o seu desenvolvimento aparecer originalmente associado à procura da resolução de problemas de durabilidade em estruturas de betão armado, apresenta evidentes efeitos positivos quer na melhoria das condições de trabalho quer no meio envolvente à obra.

O BAC aparece igualmente associado à crescente escassez de mão-de-obra especializada no Japão, que, no início da década de 80, motivou uma procura da melhoria da durabilidade das estruturas independentemente da qualidade dos trabalhos de compactação, intensificando-se assim os estudos para a obtenção de betões que dispensassem qualquer método de compactação. São estes os betões que actualmente se designam por BAC (em inglês: *Self-Compacting Concrete - SCC*).

Pode assim definir-se BAC como sendo um betão que, pelo seu próprio peso e com a energia cinética resultante da sua aplicação, seja capaz de fluir sem segregar, preenchendo todos os espaços, independentemente da presença de armaduras e da geometria da cofragem que constituem obstáculos importantes. É já considerado por muitos o desenvolvimento mais revolucionário das últimas décadas na área da construção civil, essencialmente devido ao facto de envolver um novo processo de produção e colocação do betão em obra, o qual, com base na eliminação da vibração, permite aumentar a qualidade do produto final com eventuais benefícios ao nível da diminuição do custo global da betonagem.

É igualmente de referir que, tendo em conta que muitos dos problemas do betão corrente endurecido em estruturas estão relacionados com a interferência da mão-de-obra no momento da betonagem, um betão que dispense a intervenção de mão-de-obra nessa fase corresponde a um real contributo para a redução desses mesmos problemas.

### 3. IMPACTE AMBIENTAL DO BAC

A utilização de BAC traduz-se assim em diversas mais-valias, nomeadamente na diminuição do tempo associado à tarefa de betonagem através da diminuição da quantidade de trabalhos e da menor dependência de equipamentos de compactação, bem como na possibilidade de novos sistemas construtivos. Podem ainda referir-se a maior facilidade de colocação do betão em estruturas densamente armadas e com zonas de difícil acesso, a redução do ruído na obra e, conseqüentemente, na sua envolvente, bem como a diminuição das lesões associadas ao processo de compactação por vibração e a melhoria significativa na qualidade final das superfícies de acabamento do betão.

Salienta-se que a utilização do BAC pode constituir igualmente um contributo importante no sentido de atingir um maior desenvolvimento sustentável, nomeadamente pela incorporação de quantidades significativas de subprodutos de outras indústrias (como adições), pela possibilidade de incorporação de materiais reciclados na sua composição, em substituição de agregado natural, e pelo potencial aumento da durabilidade das estruturas que conduzirá a maiores ciclos de vida com uma diminuição tanto dos custos globais das estruturas como dos materiais associados às demolições.

A necessidade específica de auto-compactação do BAC, isto é, de atingir uma elevada capacidade de escoamento, de preenchimento, de passagem, de deformabilidade, bem como uma elevada resistência a segregação, obriga necessariamente à diminuição do volume de agregado grosso e ao aumento do volume de finos e de adjuvantes (essencialmente superplastificantes). O referido aumento do volume de material fino, conseguido exclusivamente à custa de cimento, teria como principais conseqüências o aumento significativo do custo global do BAC, do seu calor de hidratação e possíveis conseqüências em propriedades como a fissuração e a retracção. Em conseqüência, são habitualmente incorporadas quantidades significativas de adições, em substituição de parte do cimento, para melhorar as propriedades de trabalhabilidade, reduzir a produção de calor de hidratação e diminuir o seu custo global.

Nesse sentido, considera-se existir ainda a possibilidade de aumentar as quantidades de adições utilizadas, quer em misturas binárias de cimento e adição, quer em composições ternárias com a mistura de cimento e duas adições. É, deste modo, possível combinar a necessidade de maior volume de material fino dos BAC com a urgência em diminuir o consumo global de cimento devido às elevadas emissões de CO<sub>2</sub> associadas à sua produção que, no curto prazo, poderá ser efectuada pela substituição do clínquer e/ou do próprio cimento por outros materiais, como por exemplo resíduos industriais. É, no entanto, essencial demonstrar a sua aplicabilidade em quantidades mais elevadas, principalmente devido às limitações regulamentares existentes relativas à sua aplicação, quer em cimentos compostos quer em substituição directa de cimento no fabrico do betão (misturas).

Relativamente ao impacto do BAC nos custos globais de uma construção, é possível obter uma redução entre 2 e 5%, quando comparado com um BC de desempenho considerado equivalente. No entanto, os custos directos de produção são superiores em 20 ou até mesmo 25% quando comparado com o referido BC [10].

É deste modo possível afirmar que o principal contributo para a redução dos custos globais da construção pela utilização de BAC em substituição de BC está relacionado, não só com a possibilidade de incorporação de quantidades significativas de resíduos de outras indústrias, como de igual modo com a melhoria de qualidade do produto final obtido quando é necessário betonar em zonas densamente armadas ou em moldes com formas menos convencionais. A potencial melhoria da durabilidade constitui igualmente um contributo importante para a redução dos custos globais da construção. Contudo, pode ainda referir-se o aumento da produtividade, a diminuição do número de trabalhadores associados à tarefa de betonagem e a melhoria geral das condições de trabalho bem como da área envolvente da construção.

Existe ainda pouca informação concreta sobre o efeito / contributo deste betão ao nível do impacte ambiental da indústria da construção e a que existe apresenta-se dispersa em publicações pontuais e de difícil interligação. Nesse sentido, são apresentados seguidamente alguns trabalhos que exploram o elevado potencial do BAC para incorporar elevadas quantidades de resíduos industriais relativamente às suas propriedades no estado endurecido (comportamento mecânico e de durabilidade).

#### 4. PROPRIEDADES DO BAC NO ESTADO ENDURECIDO

A resistência mecânica é uma das propriedades mais importantes para a maioria das aplicações práticas do betão. É possível, para um BC, correlacionar a resistência mecânica com muitas outras propriedades no estado endurecido, quer directamente através do seu valor absoluto, quer através da utilização de parâmetros indirectos como por exemplo a razão A/C ou a quantidade de cimento. No caso particular do BAC, um especial cuidado terá de ser tido com esta analogia, dado que nestes betões não se verifica a mesma correlação entre os parâmetros referidos devido essencialmente à sua especificidade em termos de composição. Para o BAC, a resistência mecânica deixou de ser a propriedade base “alvo” já que, devido às diferenças de composição apresentadas, é relativamente simples atingir valores de resistência mecânica, por exemplo, superiores a 40 ou 50 MPa. Estes valores são superiores ao habitualmente utilizado em BC em aplicações vulgares de construção. No BAC, outras exigências serão habitualmente mais condicionantes, tais como o comportamento no estado fresco (essencial num BAC) e a durabilidade.

Um BAC é composto essencialmente pelos mesmos materiais do que um BC. No entanto, a especificidade ao nível da composição, de modo a ser possível atingir as propriedades de auto-compactação e, simultaneamente, garantir uma elevada resistência à segregação e uma elevada deformabilidade, obriga à incorporação de um maior volume de material ultrafino (com o conseqüente aumento no volume de pasta), bem como de um menor volume de agregado, ou seja, provoca uma alteração evidente na granulometria do BAC. As modificações referidas irão necessariamente provocar alterações em termos de comportamento no estado fresco (principal objectivo de tais modificações) mas igualmente no estado endurecido. Como tal, comparando o BAC a um BC, poder-se-á observar a existência de determinadas alterações, ao nível da resistência mecânica, módulo de elasticidade, retração e da durabilidade em geral. Conjuntamente com as referidas alterações, o facto de o BAC não necessitar de qualquer tipo de compactação, nomeadamente de vibração, dá origem a um produto final potencialmente mais homogéneo e com maior compacidade.

##### 4.1 Propriedades Mecânicas

Os valores da resistência mecânica de um BAC, quando comparados com os de um betão convencional de composição considerada equivalente, não diferem significativamente. No entanto, e atendendo ao facto de a utilização de quantidades significativas de superplastificantes (necessários para se garantir as propriedades no estado fresco de um BAC) provocar uma redução significativa da quantidade de água de amassadura (podendo atingir reduções de 25%) e, conseqüentemente, uma redução da relação A/C, é possível conseguirem-se resistências à compressão aos 28 dias ligeiramente maiores num BAC do que num BC de composição semelhante [11].

Existem inúmeros autores que referem diferenças superiores da resistência à compressão do BAC quando comparado com um BC. O próprio guia para a Especificação, Produção e Utilização de BAC [12] refere que a ausência de vibração, bem como a maior dispersão das partículas de cimento devido à utilização de superplastificante, provocará inevitavelmente a obtenção de resistências à compressão superiores de BAC face ao BC. Por exemplo, em BAC com resistências inferiores, da ordem de 20 MPa e para valores da razão A/C equivalentes, Assié et al. [13] apresentam resistências à compressão face ao BC superiores em aproximadamente 20%, referindo que o principal motivo para tais diferenças é essencialmente a utilização de FC e de quantidades significativas de superplastificante.

De igual modo, Collepardi [14] afirma que a resistência mecânica do BAC é superior à do BC. Refere, tal como Assié et al. (2006), valores superiores em aproximadamente 20%. Collepardi [14] refere a importância das adições para o referido aumento da resistência à compressão, quer pelo efeito pozolânico de adições como por exemplo as cinzas volantes (CV), quer pelo efeito de nucleação de adições como por exemplo o filer calcário (FC). Por outras palavras, a alteração da microestrutura do BAC, provocada pela utilização de adições, é apresentada como uma das principais causas das diferenças de resistência à compressão encontradas. Domone [15] analisa mais de 70 trabalhos sobre BAC que utilizaram diversos tipos de adições e conclui que a sua utilização contribui significativamente para o aumento da resistência à compressão.

Relativamente ao módulo de elasticidade, será expectável a obtenção de valores menores para o caso dos BAC devido essencialmente à elevada incorporação de material ultrafino e adjuvantes superplastificantes. As referidas diferenças podem ser atribuídas aos volumes superiores de pasta utilizada nos BAC e conseqüente diminuição do volume de agregado grosso. Bonen e Shah [16] referem que o módulo de elasticidade do betão aumenta de forma proporcional com o aumento do volume de agregado grosso na mistura. Afirmam os autores que a referida variação do módulo de elasticidade com o volume de agregado grosso é especialmente importante para o BAC devido essencialmente ao seu menor volume de agregado grosso, quando comparado com um BC. No entanto, outros

autores referem diferenças do módulo de elasticidade entre BAC e BC inferiores a 5% [17; 18]. Inclusivamente, Parra et al. [19] indicam uma diferença de 2% relativamente aos BAC estudados no seu trabalho.

De acordo com os vários trabalhos consultados, existem, em relação à retracção do BAC, opiniões bem distintas. Em todo o caso, há um ponto comum em todos eles, que se refere ao facto de o BAC ser afectado do mesmo modo do que o BC, pela razão A/C, bem como pelo processo de cura [20]. Pode-se afirmar que, se não forem tomadas as medidas necessárias para um processo de cura adequado, os fenómenos de retracção e consequente fissuração tendem a ser mais significativos num BAC do que num BC. Apesar de alguns autores, como por exemplo Hu e Barbieri [21], apresentarem valores de retracção do BAC tendencialmente inferiores aos do BC, outros reiteram a ideia de um comportamento equivalente entre ambos [22]. De igual modo, Turcry [23] e Long et al. [24] referem que o BAC e o BC apresentam valores comparáveis de retracção.

#### 4.2 Propriedades de Durabilidade

No caso específico do BAC, as diferenças relativas à sua composição, em comparação com um BC, são condicionantes para a sua permeabilidade. O maior volume de pasta poderia, *a priori*, condicionar negativamente a sua permeabilidade. No entanto, a utilização de adições, conjuntamente com os adjuvantes superplastificantes e com a razão A/C potencialmente inferior, resulta numa matriz da pasta mais densa e compacta (inclusivamente na zona de transição agregado-pasta), o que poderá condicionar positivamente a sua permeabilidade.

Zhu e Bartos [25], no seu trabalho sobre a avaliação da permeabilidade de BAC, concluem que os BAC produzidos apresentam valores de permeabilidade ao oxigénio inferiores aos do BC com a mesma resistência mecânica. Os referidos autores concluem ainda que os BAC com menores quantidades de adições e com moduladores de viscosidade apresentam valores superiores de permeabilidade comparativamente aos BC equivalentes e até mesmo aos BAC com quantidades superiores de adições e sem moduladores de viscosidade.

Schutter [26] afirmam que, comparando um BAC e um BC com a mesma resistência à compressão, os BAC apresentam valores do coeficiente de permeabilidade, tanto à água como ao oxigénio, inferiores aos do BC, mas que, no entanto, os resultados da profundidade de penetração são equivalentes em ambos.

Boel et al. [27] apresentam, no seu trabalho sobre a permeabilidade ao oxigénio e a porosidade de BAC, valores de permeabilidade do BAC entre três a cinco vezes menores do que os do BC de referência.

Tam et al. [28] referem que o BAC apresenta valores do coeficiente de permeabilidade à água muito inferiores aos apresentados pelo BC. Os autores apresentam também resultados relativamente à influência da razão A/C no respectivo coeficiente de permeabilidade, nos quais é possível observar uma redução significativa do referido coeficiente com a diminuição da razão A/C de 0.4 para 0.23. Para valores inferiores a 0.23, os coeficientes de permeabilidade apresentados são muito semelhantes.

De igual modo, Valcuende et al. [29] referem, no seu trabalho, valores inferiores de penetração de água sob pressão de BAC quando comparado com o BC de referência, mesmo com os valores de porosidade, obtida por intrusão de mercúrio, muito semelhantes entre ambos.

Tal como referido para a permeabilidade, a especificidade do BAC em termos da sua formulação (volume de pasta superior, utilização de adições e superplastificantes) vai necessariamente provocar diferenças na sua absorção capilar relativamente a um BC.

Assié et al. [30], no seu trabalho sobre a avaliação da durabilidade de BAC, referem que, apesar de, em geral, o BAC apresentar melhores indicadores de durabilidade, os valores de absorção de água por capilaridade do BAC são superiores aos do BC de referência. Pese embora as diferenças encontradas, principalmente no trabalho de Assié et al. [30], é de salientar que a maioria dos estudos realizados, nomeadamente trabalhos mais recentes, refere que o BAC apresenta excelentes resultados relativamente aos mecanismos de transporte, não só de permeabilidade à água de acordo com o referido no ponto anterior, mas também de absorção de água por capilaridade [31].

Relativamente ao fenómeno de difusão de iões cloretos, no caso específico do BAC, é possível encontrar, nos diversos trabalhos publicados, diferenças, por vezes significativas, nomeadamente, [32]. Tang et al. [33] apresentam coeficientes de difusão de cloretos dos BAC superiores aos dos BC estudados, mesmo com valores da razão A/C de 0.4 para os BAC e de 0.5 para os BC. Afirmam os autores que as diferenças encontradas podem ser atribuídas a uma má dispersão das partículas de FC utilizadas como adições. Por outro lado, Zhu e Bartos [25] afirmam que o BAC com incorporação de CV apresenta valores do coeficiente de difusão de cloretos inferiores aos dos BC estudados pelos autores. Por outras palavras, o processo de difusão no BAC depende das proporções de mistura dos seus constituintes e pode, desse modo, ser inferior, equivalente ou superior ao de um BC. A utilização de volumes superiores de material ultrafino e a potencial redução da razão A/C, habituais num BAC, podem contribuir favoravelmente para a melhoria da sua permeabilidade e consequentemente da sua difusão. No entanto, de acordo com o apresentado, nem todo o tipo de material ultrafino, mais concretamente de adições minerais, tem o mesmo efeito no referido fenómeno de difusão.

Relativamente à carbonatação do BAC, é possível encontrar, nas publicações consultadas, resultados distintos entre si. Enquanto

alguns autores referem não ter encontrado diferenças significativas na profundidade de carbonatação entre BAC e BC com a mesma resistência mecânica e para o mesmo período de exposição, outros autores apresentam valores de penetração, para BAC, até 40% inferiores aos do BC equivalente [34].

Audenaert e Schutter [35] afirmam que as menores profundidades de carbonatação habitualmente observadas no BAC são essencialmente devidas ao aumento da quantidade de cimento e adições, associado a uma razão A/C potencialmente inferior e ao consequente aumento da resistência mecânica. No entanto, Assié [32] comparou o efeito da carbonatação aos 28 dias de diversos BAC e BC com várias resistências mecânicas e concluiu que a taxa de carbonatação dos BAC é ligeiramente superior à dos BC, para todas as classes de resistências analisadas devido, essencialmente, à maior acessibilidade da porosidade aberta dos BAC. Ainda assim, o autor refere que, apesar da taxa de carbonatação inferior, o BAC apresenta valores de profundidade de carbonatação aceitáveis.

Já Brunner [36] veio confirmar o referido por Audenaert e Schutter [35], afirmando, no seu estudo sobre a influência do tempo de cura nas propriedades do BAC com valores superiores da razão A/C, que o aumento da referida razão provoca o aumento da profundidade de carbonatação. Refere ainda que o aumento do tempo de cura provoca uma diminuição na profundidade de carbonatação. No entanto, o autor conclui que o efeito da variação da razão A/C se sobrepõe ao aumento do tempo de cura para além das primeiras 24 horas.

Valcuende e Parra [37] estudaram a profundidade de carbonatação e analisaram as propriedades da microestrutura de quatro BAC e de quatro BC em diferentes idades. Os autores concluem que os valores inferiores de penetração de CO<sub>2</sub> apresentados pelos BAC se devem à utilização do FC como adição mineral em substituição parcial de cimento, o que provocou uma microestrutura menos porosa e consequentemente mais densa. Os autores reiteram a importância das adições como o FC na penetração do CO<sub>2</sub>, tendo observado que as diferenças encontradas entre o BAC e o BC tendem a desaparecer quando o volume de finos se torna semelhante nos betões. Ainda sobre a influência das adições, é de referir o trabalho de Siddique [38]. O autor estudou o efeito da utilização de CV em substituição entre 15 e 35% de cimento na profundidade de carbonatação de BAC e apresentou valores interessantes, nomeadamente inferiores a 2 mm de penetração aos 365 dias de idade.

Mais recentemente, Zhao et al. [39] estudaram o efeito da proporção do agregado grosso na profundidade de penetração do CO<sub>2</sub> e concluíram que o aumento de volume da fracção correspondente à brita mais grossa, em detrimento da mais fina, provoca um ligeiro aumento da referida profundidade de carbonatação, isto é, quanto menor for a razão brita 1 / brita 2, maior será a profundidade de penetração do CO<sub>2</sub>.

## 5. CONCLUSÕES

A quantificação das características técnicas e económicas de uma construção é relativamente simples. Não obstante, a mesma avaliação sobre o ponto de vista ecológico / sustentável é claramente mais difícil de executar.

A indústria cimenteira está hoje identificada como uma das que mais contribui para o aumento das emissões de gases que potenciam o efeito de estufa. Enquanto a referida indústria pode e deve actuar em termos da diminuição de tais efeitos, passa também pelos utilizadores efectivar essa actuação através de uma correcta especificação dos materiais a utilizar incluindo um incremento na utilização de subprodutos, quer as diversas adições já disponíveis no mercado e com resultados comprovados quer os materiais reciclados em substituição dos convencionais.

A melhoria da durabilidade do betão é claramente um dos caminhos a seguir para atingir um desenvolvimento sustentável e os BAC podem, desse modo, dar um contributo significativo com a potencial melhoria da referida durabilidade, bem como da qualidade do produto final ao mesmo tempo que incorporam quantidades significativas de subprodutos da construção e da utilização de materiais reciclados.

A maioria dos trabalhos consultados mostra que, devido essencialmente às diferenças apresentadas relativamente à sua composição e à eliminação do processo de vibração, as propriedades do BAC no estado endurecido são equivalentes ou em alguns casos até superiores às do BC.

Em resumo, o mundo tem de avançar claramente de modo a atingir um desenvolvimento sustentável. Devido à execução de construções com materiais e consumos de energia provenientes de recursos cada vez mais escassos, a indústria da construção (incluindo todos os seus intervenientes, sem excepção) tem uma responsabilidade social acrescida e um papel essencial na implementação desse desenvolvimento sustentável, podendo a utilização de BAC contribuir significativamente para tal objectivo.

## 6. REFERÊNCIAS

- [1] Costa, C., Hydraulic binders, Construction Materials Science and Engineering (in Portuguese), M. Clara Gonçalves, Fernanda Margarido (Ed.), IST Press, ISBN 978-989-8481-17-72012, 1080 p.
- [2] Neville A. M., Properties of concrete, fourth edition, Pearson, England, ISBN: 978-0-582-23070-5, 1995, 844 p.
- [3] Mehta P. K., Monteiro P. J. M., Concrete microstructure, properties and materials, McGraw-Hill, USA, ISBN: 0071462899, 2005, 684 p.
- [4] Rodrigues F., Evangelista L., Brito J. de, A new method to determine the density and water absorption of fine recycled aggregates, Materials Research, vol.16, no.5, 2013, pp. 1045-1051.
- [5] Kibert C. J., Sustainable Construction - Green Building Design and Delivery, Published by John Wiley & Sons, Inc., Hoboken New Jersey, USA, ISBN 978-0-470-90445-9, 2012, 560 p.
- [6] Sakai K., Noguchi T., The Sustainable Use of Concrete, CRC Press, ISBN 978-0-415-66720-3, 2012, 188 p.
- [7] Camponovo R., Merz C., Vorlet L., Environmental impact assessment of building construction systems, PLEA2006, Conference on Passive and Low Energy Architecture, Geneva, Switzerland, 6-8 September, 2006.
- [8] ECTP (European Construction Technology Platform), Challenging and changing Europe's built environment, a vision for a sustainable and competitive construction sector by 2030, February, 2005a, 15 p.
- [9] ECTP (European Construction Technology Platform), Vision 2030 & strategic research agenda, focus area materials (Version 1), September, 2005b, 40 p.
- [10] Silva P. M., Brito J. de, Costa J. B., Use of self-compacting concrete (SCC) - an analysis of economic viability (in Portuguese), National Meeting Structural Concrete 2008, Guimarães, Portugal.
- [11] Silva P. M., Brito J. de, Costa J. M., Viability of two new mix design methodologies for SCC, ACI Materials Journal, Vol. 108, No. 6, 2011, pp. 579-588.
- [12] EPG (European Project Group), BIBM, CEMBUREAU, ERMCO, EFCA EFNARC, The European Guidelines for Self Compacting Concrete, Specification - Production and Use, 2005, 63 p.
- [13] Assié S., Escadeillas G., Marchese G., Waller, V., Durability properties of low-resistance self-compacting concrete, Magazine of Concrete Research, Vol. 58, No. 1, 2006, pp. 1-7.
- [14] Collepardi M., Mechanical properties of self-compacting and flowing concretes, Terence C. Holland Symposium on Advances in Concrete Technology, Warsaw, 2007, pp. 379-384.
- [15] Domone P. L., A review of the hardened mechanical properties of self-compacting concrete, Cement and Concrete Composites, Vol. 29, No. 1, 2007, pp.1-12.
- [16] Bonen D., Shah S. P., Fresh and hardened properties of self-consolidating concrete, Progress in Structural Engineering and Materials, Vol. 7, Issue 1, 2005. pp. 14-26.
- [17] Chopin D., Francy O., Lebourgeois S., Rougeau P., Creep and shrinkage of heat cured self-compacting concrete (SCC), Proceedings of the 3rd international RILEM symposium on self-compacting concrete, (PRO 33), Reykjavik, Iceland, RILEM Publications, France, 2003, pp. 672-683.
- [18] Felekoglu B., Turkel S., Baradan B., Effect of water/cement ratio on the fresh and hardened properties of self-compacting concrete, Build Environment, Vol. 42, Issue 4, 2007, pp. 1795-1802.
- [19] Parra C., Valcuende M., Gómez F., Splitting tensile strength and modulus of elasticity of self-compacting concrete. Construction and Building Materials, Vol. 29, Issue 1, 2011, pp. 201-207.
- [20] Holschemacher K., Hardened material properties of self-compacting concrete, Lithuanian Academy of Sciences - Journal of Civil Engineering and Management, Vol. X, n.º 4, 2004, pp. 261-266.



- [21] Hu C., Barbieri B., Comparaison des retraits des bétons autonivelantes et d'un béton fluide traditionnel, *Science des matériaux et propriétés des bétons*, 1ère Rencontre Internationale, Toulouse, 1998, pp. 265-272.
- [22] Pons G., Proust E., Assié S., Creep and shrinkage of self-compacting concrete: a different behaviour compared with vibrated concrete? *Proceedings of the 3rd international RILEM symposium on self-compacting concrete (PRO 33)*, Reykjavik, Iceland: RILEM Publications, 2003, pp. 645-645.
- [23] Turcry P., *Retrait et fissuration des bétons autoplaçants - Influence de la formulation*, Nantes, France, Ecole Centrale de Nantes et Université de Nantes, 2004, 230 p., Thèse de doctorat.
- [24] Long W., Khayat K. H., Xing F., Autogenous shrinkage of prestressed self-consolidating concrete, *The Open Civil Engineering Journal*, Vol. 5, 2011, pp. 116-123.
- [25] Zhu W., Bartos P. J. M., Permeation properties of self-compacting concrete, *Cement and Concrete Research*, Vol. 33, Issue 6, 2003, pp. 921-926.
- [26] Schutter G., Durability of self-compacting concrete (Final report of RILEM TC 205-Dsc), *Materials and Structures*, Vol. 41, No. 2, 2008, pp. 225-233.
- [27] Boel V., Audenaert K., Schutter G., Gas permeability and capillary porosity of self-compacting concrete, *Materials and Structures*, Vol. 41, No. 7, 2008, pp. 1283-1290.
- [28] Tam C. M., Tamb W. Y., Ng K. M., Assessing drying shrinkage and water permeability of reactive powder concrete produced in Hong Kong, *Construction and Building Materials*, Vol. 26, Issue 1, 2012, pp. 79-89.
- [29] Valcuende M., Parra C., Marcoa E., Garrido A., Martínez E., Cánoves J., Influence of limestone filler and viscosity-modifying admixture on the porous structure of self-compacting concrete, *Construction and Building Materials*, Vol. 28, Issue 1, 2012, pp. 122-128.
- [30] Assié S., Escadeillas G., Waller V., Estimates of self-compacting concrete 'potential' durability, *Construction and Building Materials*, Vol. 21, Issue 10, 2007, pp. 1909-1917.
- [31] Safiuddin M., West J. S., Soudki K. A., Durability performance of self-consolidating concrete, *Journal of Applied Sciences Research*, Vol. 4, No. 12, 2008, pp. 1834-1840.
- [32] Assié S., *Durabilité des bétons autoplaçants*, Toulouse, France, L'Institut National des Sciences Appliquées de Toulouse, 2004, 254 p., Thèse de doctorat.
- [33] Tang L., Andalen A., Johansson J., Hjelm S., Chloride diffusivity of self-compacting concrete, *Proceedings pro007: First International RILEM Symposium on Self-Compacting Concrete*, Stockholm, Sweden, 1999, RILEM Publications, ISBN: 2-912143-09-8, 1999, pp. 187-198.
- [34] RILEM Report 038, *Durability of self-compacting concrete - state-of-the-art Report of RILEM Technical Committee 205-DSC*. G. De Schutter and K. Audenaert (editors), RILEM Publications, e-ISBN: 978-2-35158-077-6, 2007, 208 p.
- [35] Audenaert K. e Schutter G., Chloride penetration in self-compacting concrete, *Proceedings of the 3rd international RILEM symposium on self-compacting concrete, (PRO 33)*, Reykjavik, Iceland, RILEM Publications, 2003, pp. 818-825.
- [36] Brunner M., *Durability of SCC with high water content*, The Second North American Conference on the Design and Use of Self-Consolidating Concrete (SCC), Hanley-Wood, LLC, Addison, Illinois, 2005, pp. 333-340.
- [37] Valcuende M., Parra C., Natural carbonation of self-compacting concretes, *Construction and Building Materials*, Vol. 24, Issue 5, 2010, pp. 848-853.
- [38] Siddique R., Properties of self-compacting concrete containing class F fly ash, *Materials & Design*, Vol. 32, Issue 3, 2011, pp. 1501-1507.
- [39] Zhao H., Sun W., Wu X., Gao B., The effect of coarse aggregate gradation on the properties of self-compacting concrete, *Materials & Design*, Vol. 40, 2012, pp. 109-116.

# A NANOTECNOLOGIA APLICADA ÀS ARGAMASSAS DE REVESTIMENTO

**INÊS FLORES-COLEN**  
Professora Auxiliar  
(IST)  
Lisboa

**ANTÓNIO SOARES**  
Bolsheiro de investigação  
(IST)  
Lisboa

**JORGE DE BRITO**  
Professor Catedrático  
(IST)  
Lisboa

## SUMÁRIO

No presente artigo, é feita uma síntese sobre os nanomateriais que têm sido incorporados em rebocos ou nas camadas de acabamento destes sistemas de revestimento. É expectável que a nanotecnologia ajude na formulação de argamassas inovadoras com desempenho melhorado e claros benefícios técnicos, económicos, ambientais e energéticos. Da recolha bibliográfica efectuada, dividiu-se os nanomateriais susceptíveis de serem utilizados em argamassas em três grupos: i) os que contribuem para uma geral melhoria do comportamento mecânico, físico e químico da argamassa; ii) os que actuam na superfície das argamassas e das camadas de acabamento, melhorando a protecção à acção da água e aos *graffiti* e permitindo novas propriedades foto-catalíticas e de auto-limpeza; iii) os que contribuem para um melhor desempenho das argamassas em termos térmicos, acústicos e de comportamento ao fogo. O artigo também identifica dificuldades e limitações do uso destes nanomateriais, em particular as relacionadas com o efeito na trabalhabilidade e na reologia da argamassa no estado fresco, os custos envolvidos e a toxicidade associada à inalação de nanopartículas em suspensão.

## ABSTRACT

This paper presents a synthesis about nanomaterials that have been incorporated in renders or in finishing coatings. Nanotechnology can help in the formulation of innovative mortars with a better performance and clear technical, economic, environmental and energetic benefits. Nanomaterials that can be used in mortars have been divided into three groups, according to the literature review: i) the ones that contribute to the improvement of the mechanical, physical and chemical behaviour of the mortar; ii) the ones that improve the protection of the surface of the mortar to water action and graffiti, allowing new photo-catalytic and auto-cleaning properties; iii) the ones that contribute to a better thermal, acoustical and fire behaviour of the mortar. This paper also identifies the drawbacks of the use of these nanomaterials, specially the effects on the workability and rheology of the mortar at the fresh state, the costs involved and the toxicity associated to the inhalation of nanoparticles in suspension.

## 1. INTRODUÇÃO

A definição de nanotecnologia pode variar, mas normalmente é associada à manipulação e compreensão de matéria à escala nanométrica (0,1 a 100 nm), permitindo produzir novos materiais em quase todos os ramos da tecnologia com aplicações no mundo real [1, 2]. Um nanomaterial (ou uma nanoestrutura) tem pelo menos uma dimensão crítica inferior a 100 nm ( $= 10^{-7}$  m). Os nanomateriais são tipicamente classificados em 0-D (nanopartículas), 1-D (nanotubos, nanofilamentos e nanofibras), 2-D (nanofilmes e nano-revestimentos), e 3-D (maciço). Esta classificação baseia-se no número de dimensões não confinadas à escala nano [3].

Os nanomateriais têm mostrado um potencial significativo na protecção do ambiente e na sustentabilidade, pelo que, a médio e longo prazo, o desenvolvimento da nanotecnologia conduzirá a novas abordagens no desenvolvimento e produção de materiais com uma eficiência energética melhorada [2, 4]. Espera-se que a nanotecnologia ajude na formulação de materiais inovadores com elevado desempenho e claros benefícios técnicos, económicos, ambientais e energéticos [4, 5].

O presente artigo faz uma síntese da aplicação da nanotecnologia às argamassas de revestimento, de base cimentícia, através da recolha e síntese bibliográfica do uso recente de vários nanomateriais. Pretende-se com este artigo destacar as principais potencialidades e benefícios da aplicação dos nanomateriais nas argamassas de revestimento bem como as respectivas limitações e riscos.

## 2. ARGAMASSAS DE REVESTIMENTO

Uma argamassa corresponde a uma mistura de um ou mais ligantes orgânicos ou inorgânicos, agregados, cargas, adições e/ou adjuvantes [6]. Estão englobadas nas argamassas da construção, argamassas de assentamento de alvenaria, argamassas de revestimento (correntemente designadas por rebocos), argamassas de juntas e argamassas de regularização de pavimentos (correntemente designadas por betonilhas) [7]. Por conseguinte, as argamassas de construção apresentam formulações distintas para diferentes aplicações, recorrendo a tecnologias tradicionais ou mais competitivas, face às maiores necessidades do mercado da manutenção e reabilitação. Apesar de o mercado das argamassas ser ainda muito tradicional (argamassas produzidas em estaleiro), é cada vez maior o uso de argamassas industriais. Enquanto as argamassas tradicionais ou convencionais são doseadas em obra e executadas de acordo com procedimentos convencionais, com aplicação geralmente manual, nas argamassas industriais, também correntemente designadas por pré-doseadas, os constituintes são pré-seleccionados e doseados em fábrica, com mistura fornecida em pó (neste caso, é necessário adicionar água em obra) ou em pasta (fornecida em silos, pronta a utilizar), cuja aplicação é feita geralmente por projecção mecânica [8]. A marcação CE, a partir de 2004 para as argamassas de construção, veio fornecer requisitos gerais para o adequado desempenho em serviço destes sistemas de revestimento.

As argamassas de revestimento são um importante grupo das argamassas de construção. De acordo com o Censos 2011 [9], as argamassas tradicionais ou marmorite continuam a ser a solução de revestimento predominante em edifícios de habitação, representando cerca de 84% dos revestimentos em paredes de edifícios correntes. As argamassas de revestimento têm como funções principais: i) protecção das paredes contra as acções externas; ii) impermeabilização e resistência à água das paredes; iii) acabamento das paredes; iv) conferir adequada durabilidade para acções correntes de manutenção, durante a respectiva vida útil [8, 10].

## 3. INFLUÊNCIA DOS NANOMATERIAIS NO DESEMPENHO DAS ARGAMASSAS DE REVESTIMENTO

A introdução de nanomateriais nas argamassas de revestimento deve permitir melhorar, a custos aceitáveis de produção, o comportamento mecânico, comportamento à água e/ou o aspecto estético, ao longo do tempo e em condições reais de serviço destas argamassas. Através da recolha bibliográfica, são identificados vários nanomateriais que têm sido utilizados nas argamassas cimentícias destinadas a revestimento de paredes. Neste sub-capítulo, é feita uma discussão das vantagens e limitações desses nanomateriais, excluindo portanto soluções de argamassas maioritariamente de cal ou para produtos / filmes a aplicar na conservação de argamassas de paredes antigas, como por exemplo consolidantes [11].

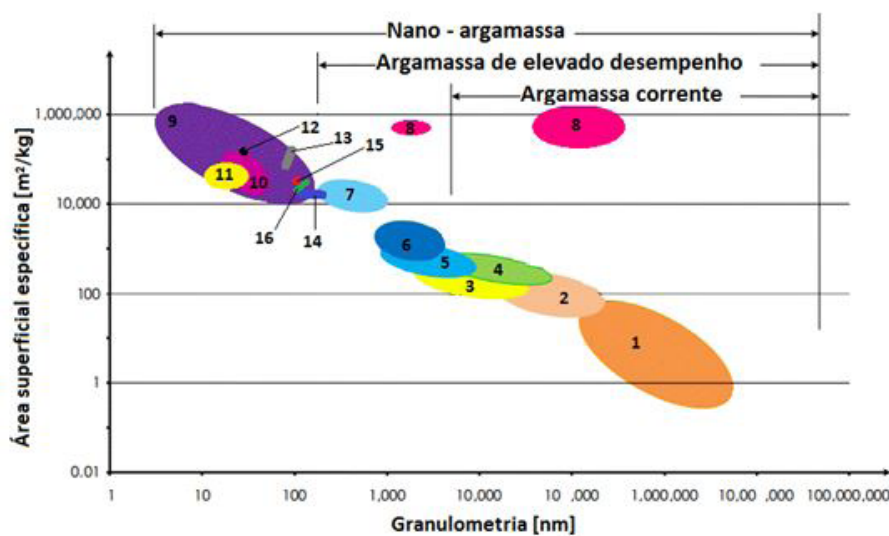
### 3.1.1. Melhoria do desempenho mecânico, físico e químico das argamassas

Vários estudos demonstram que a incorporação de nanotubos de carbono (de parede dupla) em argamassas e pastas cimentícias melhora as respectivas propriedades mecânicas. Através de uma pequena taxa de incorporação (0,5 % da massa do cimento), é possível aumentar a resistência à flexão entre 10 e 25% e 19% a resistência à compressão das argamassas [12, 13, 14]. Outras vantagens

na incorporação dos nanotubos é a prevenção de fissuras a uma escala nanométrica [15, 16] e a melhoria na durabilidade através de uma melhor resistência a ataque químico, já que os nanotubos incorporados reduzem os poros finos da matriz de cimento, resultando na redução dos fenómenos de capilaridade [16]. Apesar destas vantagens, são referidas pelos estudos anteriores três importantes limitações da incorporação destes nanomateriais. A primeira, de carácter técnico, encontra-se relacionada com o processo de mistura, ou seja, é necessária uma boa dispersão dos nanotubos na mistura cimentícia, que é dificultada pela natureza hidrofóbica destes nanomateriais e pelos compostos formados na sua produção [15, 17]. A segunda limitação, do ponto de vista económico, reside no custo elevado de produção e fornecimento deste nanomaterial, embora este aspecto possa ser minimizado através de produções de larga escala de nanotubos de qualidade inferior mas igualmente adequados para aplicações em argamassas [18, 19]. A terceira limitação, em termos de toxicidade, quando inaladas as nanopartículas em suspensão, podem depositar-se no sistema respiratório. A elevada área superficial das nanopartículas, relativamente a micropartículas de idêntica composição química, torna-as activas do ponto de vista fisiológico, constituindo um potencial inflamatório e pró-oxidante [3, 20].

Outro dos nanomateriais que têm sido incorporados nos materiais cimentícios são as nanopartículas de sílica ( $\text{SiO}_2$ ), as quais têm revelado bons resultados em termos de resistência à compressão e a tensões de corte, reduzindo a permeabilidade à água da argamassa [21]. As nanopartículas de sílica, quando misturadas nos materiais cimentícios, aceleram a hidratação do cimento, aumentam a actividade pozolânica, reduzem os tamanhos dos poros e melhoram a ligação entre a pasta de cimento endurecida e o agregado, conduzindo a maiores resistências da argamassa. A redução do tamanho das nanopartículas interfere na cinética reaccional do cimento através de forças electrostáticas mais intensas e da maior área superficial. As limitações deste nanomaterial encontram-se também relacionadas com os efeitos na trabalhabilidade e reologia das misturas produzidas, devido à sua elevada área superficial específica e à dispersão de nanopartículas que podem causar baixas resistências das argamassas nas idades mais avançadas [22]. De forma a garantir uma boa dispersão das nanopartículas de sílica, vários autores sugerem a incorporação de baixas percentagens, entre 1 e 10% da massa de cimento [23, 24]. Por outro lado, a significativa redução do tempo de hidratação do cimento, o aumento do custo do produto final e o aumento de fissuras responsáveis pela fractura a cargas inferiores são factores que podem restringir o uso de nanopartículas de sílica [3].

Na Figura 1, é apresentada uma síntese dos vários constituintes correntes em argamassas de revestimento. Existe também informação adicional de outros nanomateriais, que não são objecto de detalhe neste artigo. Verifica-se que tanto os nanotubos de carbono como as partículas de nanosílica apresentam reduzidas dimensões mas elevada área superficial específica, estando claramente na região da nanotecnologia aplicada às argamassas. A Tabela 1 exemplifica mais em detalhe os valores apresentados no gráfico para os nanomateriais, através de recolha bibliográfica.



**Legenda:** 1 - areia natural; 2 - agregados finos; 3 - cinzas volantes; 4 - cimento portland; 5 - aditivos minerais finos; 6 - metacaulino; 7 - sílica de fumo; 8 - aerogel de sílica; 9 - nanosílica; 10 - sílica precipitada; 11 - nanopartículas de titânio; 12 - nanotubos de carbono; 13 - nanoalumina; 14 - nanocal; 15 - nanometacaulino; 16 - nanoargilas

Figura 1 - Distribuição da dimensão das partículas e a área superficial específica dos constituintes das argamassas, baseado em [25, 26]

### 3.1.2. Melhoria da condição da superfície das argamassas

O aparecimento de manchas em revestimento de argamassas aplicadas em fachadas de edifícios ocorre durante a vida útil, normalmente, sob a forma de descolorações ou colorações das superfícies expostas, sendo de difícil remoção. As primeiras estão associadas à mudança de brilho e tonalidade em materiais porosos; as segundas apresentam-se sob várias formas: manchas escuras, quando se dá a acumulação de sujidade ou na presença de humidade, manchas brancas, no caso da cristalização de sais ou manchas de diversas cores, associadas à acção de agentes biológicos ou em resultado de deficientes acções de manutenção (limpeza ou reparação) [27].

Tabela 1: Distribuição da dimensão das partículas e a área superficial específica dos nanomateriais constituintes das argamassas

Nanomaterial	Dimensão [nm]	Área superficial específica [m <sup>2</sup> /g]
Aerogel de sílica		984
Nanosílica	5 a 100	27 a 656
Nanopartículas de titânio	20 a 50	35 a 65
Nanotubos de carbono	50	184 a 189
Nanoalumina	13 a 20	85 a 200
Nanocal	160 a 380	28
Nanometacaulino	100	48
Nanoargilas	100 a 200	28 a 48

A aplicação de nanomateriais em tratamentos de protecção da superfície de argamassas tem sido crescente. Destaca-se, por exemplo, a aplicação de emulsões ou filmes nanoestruturados, hidrófugos e/ou oleófugos em superfícies porosas para melhor resistência destas à absorção de água e de tintas de *graffiti*, respectivamente [29]. Estes produtos têm capacidade de auto-polimerização e são resistentes às radiações UV. Podem no entanto, reduzir a porosidade da superfície, conduzindo a uma menor permeabilidade ao vapor de água. São vários os autores que tentam estudar a eficácia destes tipos de protecção face aos produtos convencionais.

Por outro lado, a incorporação de nanopartículas de dióxido de titânio (TiO<sub>2</sub>) tem sido utilizada para melhorar as propriedades ao nível da superfície da argamassa de revestimento ou do seu acabamento (pinturas) quando aplicados no exterior, nomeadamente introduzindo propriedades foto-catalíticas (auto-limpeza, despoluição e antibacteriana), de anti-condensação, e hidrofílicas / hidrofóbicas [3, 19, 28, 30, 31], garantindo níveis estéticos adequados para a superfície das argamassas. Adicionalmente, estes nanomateriais podem ser convenientemente misturados em materiais cimentícios, sem a necessidade de tratamentos adicionais, e quanto maior for a sua percentagem de incorporação mais rápida será a reacção de hidratação do cimento, sendo mais eficiente a incorporação de partículas mais finas de dióxido de titânio do que percentagens maiores de incorporação [28, 32]. Na Figura 1, verifica-se que estes nanomateriais estão também na região da nanosílica, com reduzida dimensão das partículas e elevada área superficial específica. Mais uma vez, a incorporação deste nanomaterial pode conduzir à formação de compostos com alguns riscos, requerendo maior informação sobre a respectiva toxicidade [19]. O uso de partículas finas de óxido de titânio pode afectar negativamente as propriedades reológicas da argamassa, resultando numa maior quantidade de água necessária e num reduzido tempo de presa [31]. Estudos referem que a incorporação de 5 a 10% de nano-TiO<sub>2</sub> em substituição do cimento, apesar do aumento da resistência à compressão nos primeiros dias, conduz a decréscimos entre 10 e 19% aos 28 dias [33]. Também é referido que a mistura deste nanomaterial com o cimento conduz a custos mais elevados, embora a redução do tempo de hidratação (se controlado) possa conduzir a benefícios económicos devido à redução do prazo de construção. Por outro lado, o facto de reduzir a concentração de poluentes na superfície pode a longo prazo proporcionar melhorias da qualidade do ar urbano, reduzindo o elevado impacte ambiental inicial [28].

### 3.1.3. Melhoria do desempenho térmico e acústico das argamassas

Para melhoria do desempenho térmico das argamassas, têm sido incorporados agregados leves, de natureza e processo de transformação diferentes. Neste campo, destaca-se a incorporação de aerogéis de sílica, que podem ser puramente inorgânicos, orgânicos ou híbridos. Os aerogéis de sílica são materiais nano-estruturados, altamente porosos (poros reduzidos, com 10 - 100 nm), com densidades entre 3 e 500 kg/m<sup>3</sup>, que apresentam excelentes propriedades térmicas e acústicas (condutibilidade térmica na gama de 0,01-0,02

W/m.K e impedância acústica na gama 103-106 kg/m<sup>2</sup>s), o que os coloca em conformidade com as exigências actuais de poupança de energia e redução de ruído [29, 34, 35, 36, 37]. Este material nanoestruturado pode apresentar várias granulometrias, podendo ser moído ou peneirado, sem alterar a sua estrutura interna de poros (Figura 2).

Existem estudos preliminares sobre a utilização de grânulos de aerogel como agregados em argamassas de revestimento, no âmbito da reabilitação térmica de edifícios históricos [38].



Figura 2 - Aerogel híbrido moído e peneirado, com diferentes granulometrias

Neste estudo, a incorporação de 60 a 90% em volume de grânulos de aerogel de sílica na argamassa conduziu a valores de  $0,025 \pm 0,002$  W/m.K para a condutibilidade térmica da argamassa com uma densidade de aproximadamente 200 kg/m<sup>3</sup>, aplicada com uma espessura de 6 cm. No entanto, nesse estudo não é especificada a resistência mecânica, característica importante para argamassas mais leves tendo em conta também a adequabilidade de determinados tipos de suporte. Embora sejam referidos custos adicionais de 40 a 80 €/m<sup>2</sup>, dificultando aplicações correntes [39], existem formas de produção de aerogel menos agressivas para o meio ambiente (através do processo sol-gel e secagem à temperatura ambiente em vez de secagem supercrítica) e com menores custos [33]. Na Figura 3, ilustra-se a medição da condutibilidade térmica em provetes de argamassa com incorporação de aerogel de sílica.

A incorporação do aerogel afecta a estrutura porosa da argamassa, que é uma estrutura macroporosa (poros de dimensão média superior a 50 nm) com mesoporos do tipo fenda (com diâmetro médio entre 2 e 50 nm) e microporos (poros de dimensão média inferior a 2 nm). Estudos referem que a incorporação de 24% em volume de aerogel de sílica torna a argamassa cimentícia mais porosa, através da redução da fracção de microporos, com o aumento simultâneo do volume de poros e da área superficial da argamassa. Os resultados conduziram a uma argamassa com maior permeabilidade ao vapor, o que é explicado pela maior contribuição dos mesoporos.

Neste estudo, a argamassa com aerogel apresentou maiores valores de absorção capilar do que a argamassa só com cimento, o que é explicado não só pela maior porosidade da argamassa mas também pelo facto de o aerogel inorgânico utilizado ter alguns grupos silanol residuais que são hidrofílicos [40]. Este último aspecto poderá ser melhorado com o uso de aerogéis híbridos hidrofóbicos. No entanto, é necessária uma adequada dispersão destes aerogéis, correntemente através de metanol, conduzindo a misturas cimentícias mais estáveis mas também para reduzir os poros entre as partículas da hidratação que têm influência na ligação entre o aerogel e o cimento. Neste estudo, não se detectaram reacções químicas entre o aerogel e a pasta de cimento [41].



Figura 3 - Medição da condutibilidade térmica em provetes de argamassa com aerogel.

Outra vantagem referida nos estudos consultados diz respeito à estabilidade do aerogel a temperaturas elevadas (até 1150 °C), sendo dificilmente inflamável, não emitindo gases nem apresentando deformações a essas temperaturas [41].



### 3.1.4. Síntese comparativa dos nanomateriais identificados

A Tabela 2 faz uma síntese comparativa dos nanomateriais analisados através da recolha bibliográfica.

Em conclusão, os nanotubos e as nanopartículas de sílica podem melhorar, essencialmente, as características mecânicas da argamassa através de pequenas percentagens de incorporação. São também referidos um melhor comportamento das argamassas face à água (efeitos nos mecanismos de transporte de capilaridade) e, conseqüentemente, melhor resistência química. No entanto, a fase de produção das argamassas é crítica para as propriedades no estado endurecido, sendo importante analisar a influência do método de mistura (dispersão destes nanomateriais na pasta cimentícia) nas propriedades reológicas das argamassas. São também ainda escassos, mas muito relevantes, a indicação dos reais custos de incorporação destes materiais e os seus efeitos ambientais, ao nível da respiração de nanopartículas em suspensão.

Relativamente à incorporação de pequenas percentagens de nanopartículas de dióxido de titânio, destaca-se a possibilidade de conferir novas propriedades às superfícies das argamassas de revestimento e respectivos acabamentos, em particular as propriedades de decomposição fotocatalítica de poluentes, a função de auto-limpeza e de anti-condensação e o carácter hidrofílico e hidrofóbico. Estas novas propriedades podem contribuir para minimizar os mecanismos de degradação à superfície das argamassas, garantindo níveis estéticos adequados ao longo do tempo em serviço. Mais uma vez, a influência na trabalhabilidade da argamassa e os custos são factores de limitação que devem ser investigados em detalhe.

Tabela 2- Síntese comparativa dos efeitos da incorporação de vários nanomateriais em argamassas, através de recolha bibliográfica

Tipo	%	Trabalhabilidade e mistura	Resistência à tracção	Resistência à compressão	Propriedades físicas	Durabilidade	Custos	Impacte ambiental
Nanotubos de carbono	Baixa	▼	▲	▲	Absorção capilar ▼	▲	€€€	n.s.
Nanosílica	Baixa	▼	▲	▲ inicial ▼ idades+ avançadas	Permeabilidade à água líquida ▼	n.s.	n.s.	n.s.
NanoTiO <sub>2</sub>	Baixa	▼	n.s.	▲ inicial ▼ 28 dias	Foto-catalítica e de auto-limpeza (novas propriedades)	n.s.	€€	▲ inicial ▼ final
Aerogel de sílica	Alta	Depende do tipo de aerogel	n.s.	n.s.	Condutibilidade térmica ▼; secagem ▲; porosidade ▲; comportamento ao fogo ▲; absorção capilar ▲	n.s.	€€€	▲ inicial ▼ final

Legenda: % - percentagem de incorporação; ▼ - diminui; ▲ - aumenta; €€€ - custo elevado; €€ - custo médio; € - custos económicos; n.s. - não especificado.

O uso de aerogéis de sílica pode melhorar outras características das argamassas de revestimento, possibilitando novas aplicações que exigem a melhoria dos desempenhos térmico, acústico e ao fogo. Estes nanomateriais permitem aumentar a porosidade da argamassa, ao nível dos mesoporos, reduzindo o coeficiente de condutibilidade térmica e aumentando a permeabilidade ao vapor (maior facilidade de evaporação da água absorvida). Também o bom comportamento a temperaturas elevadas do aerogel de sílica pode potenciar a aplicação de argamassas de melhor comportamento ao fogo. As limitações referidas nos estudos dependem também do tipo de aerogel e do processo de produção utilizado (processo sol-gel e tipo de secagem), destacando-se a questão da dispersão e mistura na pasta cimentícia, os custos de produção do aerogel e da argamassa como produto final e, ainda, a menor resistência à absorção capilar em aerogéis não hidrofóbicos. Adicionalmente, salienta-se a possibilidade de argamassas térmicas mas com incorporação elevada deste nanomaterial, cujo custo poderá ser minimizado em produções industriais, a larga escala, de aerogel.

Por fim, a informação específica relativa aos benefícios ambientais e riscos de toxicidade destes nanomateriais anteriores continua a ser escassa.

#### 4. CONCLUSÃO

A nanotecnologia tem tido crescente aplicação nas argamassas de revestimento, através da melhoria das propriedades da própria argamassa e/ou da sua superfície de acabamento. Os nanomateriais que têm sido utilizados nas argamassas de revestimento correspondem a nanopartículas, nanotubos, nanofilmes e sólidos nanoestruturados. Estes nanomateriais com elevada área superficial específica alteram a microestrutura das argamassas produzidas permitindo, em vários casos, melhorias significativas ao nível das propriedades mecânicas, tais como a incorporação de nanotubos de carbono e nanopartículas de sílica que aumentam a compacidade da argamassa. Ao nível da melhoria da superfície, foram identificadas emulsões nanoestruturadas que permitem melhorar a protecção à água e às tintas *graffiti* ou a incorporação de nanopartículas à base de sílica e titânio. Estes nanomateriais criam um novo campo de resposta das argamassas de revestimento, quer ao nível do desempenho estético em serviço quer na contribuição para um ambiente urbano “mais limpo” e sustentável. Por último, a incorporação de aerogel de sílica fornece outras possibilidades na melhoria térmica, acústica e de comportamento ao fogo das argamassas de revestimento.

Apesar das vantagens referidas, estes nanomateriais devido à sua elevada área superficial específica e à sua hidrofobicidade (na maioria dos casos), afectam a trabalhabilidade e a reologia das argamassas, sendo muito importante garantir uma sua adequada dispersão na mistura cimentícia. Também a sua granulometria é variada, ao nível dos nanomateriais estudados, o que justifica diferentes propriedades nas argamassas produzidas, nomeadamente ao nível da densidade e da porosidade (incluindo o tamanho dos poros) em estado endurecido, o que afecta propriedades relevantes como o comportamento de absorção à água e difusão de vapor de água. Embora na maioria as partículas apresentem uma dimensão máxima de 100 nm, existem nanomateriais (neste caso o aerogel) que podem apresentar granulometrias semelhantes aos materiais convencionais constituintes das argamassas (cimento ou areia). Adicionalmente, os elevados custos de produção destes nanomateriais e, conseqüentemente, das argamassas produzidas pode levar a restrições no seu uso. No entanto, as limitações económicas podem ser superadas, recorrendo a processos de produção mais económicos e sustentáveis, quer por aplicações específicas de argamassas de desempenho melhorado (como, por exemplo, no tratamento de pontes térmicas ou na melhoria de comportamento ao fogo dos elementos revestidos). Outra limitação geral dos nanomateriais referidos está relacionada com a escassa informação em termos da durabilidade das argamassas produzidas, dos reais benefícios ambientais e dos efectivos riscos humanos ao nível da toxicidade das nanopartículas inaladas.

Assim, a nanotecnologia poderá ser uma importante ferramenta na inovação das argamassas, mas ainda existem aspectos que carecem de maior investigação para a formulação de produtos sustentáveis, com propriedades melhoradas mas com custos competitivos no mercado e com o adequado controlo dos riscos humanos.

#### 5. AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem o apoio do ICIST e da FCT pelo financiamento do projecto de investigação NANORENDER - PTDC/ECM/118262/2010.

#### 6. REFERÊNCIAS

- [1] SAXL, O. Opportunities for industry in the application of nanotechnology, The Institute of Nano-technology, UK, 2001.
- [2] ZHU, W.; BARTOS, PJM; PORRO, A. Application of nanotechnology in construction - Summary of a state-of-the-art report. RILEM TC 197-NCM: “Nanotechnology in construction materials”. Materials and Structures Vol. 37, Issue 273 (2004), pp. 649-658.
- [3] GONÇALVES, MC. Nanomateriais. Ciência e Engenharia de Materiais de Construção. Ed. MC Gonçalves e F. Margarido, IST Press (2012), pp. 727-771.
- [4] GLEIZE, PJP; SILVA, da. A nanotecnologia aplicada a materiais cimentícios. VI Simpósio Brasileiro de Tecnologia de Argamassas, Florianópolis, 2005, CD-ROM.
- [5] SOARES, A.; FLORES-COLEN, I.; BRITO, J. de. Nanorenders on building facades: technical, economic and environmental performance. XIII International Conference on Durability of Building Materials and Components, Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, 02-05 Setembro 2014.
- [6] EMODICO. The EModico Online Dictionary. Disponível em <http://www.euomortar.com/home>, consultado em Fevereiro de 2014.

- [7] APFAC. Disponível em <http://www.apfac.pt>, consultado em Fevereiro de 2010.
- [8] FLORES-COLEN, I.; BRITO, J. de. Rebocos. Ciência e Engenharia de Materiais de Construção. Ed. MC Gonçalves e F. Margarido, IST Press (2012), pp. 65-144.
- [9] INE Censos 2011: 'XV recenseamento geral da população e V recenseamento geral da habitação - Resultados definitivos'. Lisboa: Instituto Nacional de Estatística (2012), 599 p.
- [10] VEIGA, R. Comportamento de revestimentos de fachadas com base em ligante mineral. Exigências funcionais e avaliação do desempenho. 1º Congresso Nacional de Argamassas de Construção, Lisboa, 2005, CD
- [11] NOGUEIRA, R.; PINTO, APF; GOMES, A. Study of some consolidation treatments for lime mortars. 3rd Historic Mortars Conference, 11- 14 September 2013, Glasgow, Scotland, 8p, CD-ROM.
- [12] LI, G.; WANG, P.; ZHAO, X. Mechanical behavior and microstructure of cement composites incorporating surface-treated multi-walled carbon nanotubes, Carbon Vol. 43, Issue 6 (2005), pp. 1239-1245.
- [13] CWIRZEN, A.; HABERMEHL-CHIRZEN, K.; PENTTALA, V. Surface decoration of carbon nanotubes and mechanical properties of cement/carbon nanotube composites, Adv. Cem. Res Vol. 20, Issue 2 (2008), pp. 65-73.
- [14] LI, G.; WANG, P.; ZHAO, X. Pressure-sensitive and microstructure of carbon nanotube reinforced cement composites, Cement Concrete Comp. Vol. 29, Issue 5 (2007), pp. 377-382.
- [15] KONSTA-GDOUTOS, M.; METAXA, Z.; SHAH, S. Highly dispersed carbon nanotube reinforced cement based materials, Cement Concrete Res. Vol. 40, Issue 7(2010), pp. 1052-1059.
- [16] KONSTA-GDOUTOS, M.; METAXA, Z.; SHAH, S. Multi-scale mechanical and fracture characteristics and early-age strain capacity of high performance carbon nanotube/cement nanocomposites, Cement Concrete Comp. Vol. 32, Issue 2 (2010), pp. 110-115.
- [17] GROBERT, N., Carbon nanotubes becoming clean Mater. Today. Vol. 10, Issue (1-2) (2007), pp. 28-35.
- [18] SEE, C. AND HARRIS, A., A review of carbon nanotube synthesis via fluidized-bed chemical vapor deposition, Ind. Eng. Chem. Res. Vol. 46, Issue 4 (2007), pp. 997-1012.
- [19] HANUS, M. AND HARRIS, A. Nanotechnology innovations for the construction industry, Prog. Mater Sci. Vol. 58, Issue 7 (2013), pp. 1056-1102.
- [20] LAM, CW; JAMES, RM; MCCLUSKEY, R.; AREPALLI, S.; HUNTER, R. A review of carbon nanotube toxicity and assessment of potential occupational and environmental health risks. Critical Review in Toxicology. Vol. 36 (2006), pp. 199-217.
- [21] SADRMOHTAZI, A., FASIHI, A., BALALAEI, F. AND HAGHI, A. Investigation of mechanical and physical properties of mortars containing silica fume and nano-SiO<sub>2</sub>, in The Third International Conference on Concrete and Development (Building and Housing Research Center) (2009), pp. 1153-1161.
- [22] KAWASHIMA, S., HOU, P., CORR, D. AND SHAH, S. Modification of cement-based materials with nanoparticles, Cement Concrete Comp. Vol. 36, Issue 1 (2013), pp. 8-15.
- [23] SENFF, L., LABRINCHA, J., FERREIRA, V., HOTZA D. AND REPETTE, W. Effect of nano-silica on rheology and fresh properties of cement pastes and mortars, Constr. Build. Mater. Vol. 23, Issue 7 (2009), pp. 2487-2491.
- [24] LTIFI, M., GUEFRECH, A., MOUNANGA, P. AND KHELIDJ, A. Experimental study of the effect of addition of nano-silica on the behaviour of cement mortars, Procedia Eng. Vol. 10 (2011), pp. 900-905.
- [25] SOBOLEV, K.; FLORES, I.; HERMOSILLO, R.; TORRES-MARTÍNEZ, L. Nanomaterials and nanotechnology for high-performance cement composites. Proceedings of ACI Session on "Nano-technology of Concrete: Recent Developments and Future Perspectives", Denver, USA (2006), pp. 91-118.
- [26] SOBOLEV, K.; GUTIÉRREZ, M. How nanotechnology can change the concrete world. Part one of a two-part series. American Ceramic Society Bulletin, Vol. 84, Issue 10 (2005), pp. 14-18.
- [27] FLORES-COLEN, I.; BRITO, J. de; FREITAS, VP. Stains in facades' rendering - Diagnosis and maintenance techniques' classification. Constr. Build. Mater., Vol. 22, Issue 3 (2008), pp. 211-221.

- [28] JAYAPALAN, A., LEE, B. AND, KURTIS, K. Can nanotechnology be 'green'? Comparing efficacy of nano and microparticles in cementitious materials, *Cement. Concrete Comp.* Vol. 36 (2013), pp. 16-24.
- [29] CÁRDENAS, C., TOBÓN, J., GARCÍA, C.; VILA, J. Functionalized building materials: Photo-catalytic abatement of NO<sub>x</sub> by cement pastes blended with TiO<sub>2</sub> nanoparticles, *Constr. Build. Ma-ter.* Vol. 36 (2012), pp. 820-825.
- [30] SENFF, L., TOBALDI, D., LUCAS, S., HOTZA, D., FERREIRA, V.; LABRINCHA, J. Formulation of mortars with nano-SiO<sub>2</sub> and nano-TiO<sub>2</sub> for degradation of pollutants in buildings, *Compos. Part B - Eng.* Vol. 44, Issue 1(2013), pp. 40-47.
- [31] CHEN, J., KOU, S.; POON, C. Hydration and properties of nano-TiO<sub>2</sub> blended cement composites, *Cement Concrete Comp.* Vol. 34, Issue 5 (2012), pp. 642-649.
- [32] MENG, T., YU, Y., QIAN, X., ZHAN, S.; QIAN, K. Effect of nano-TiO<sub>2</sub> on the mechanical properties of cement mortar, *Constr. Build. Mater.* Vol. 29 (2012), pp. 241-245.
- [33] ILHARCO, LM.; FIDALGO, A.; FARINHA, JP; GASPAS MARTINHO, JM.; ROSA, ME. Nanostructured silica/polymer subcritical aerogels. *Journal of Materials Chemistry.* Vol. 19 (2007), pp. 2195-2198.
- [34] ZHU, W.; BARTOS, PJM; PORRO, A. Application of nanotechnology in construction - Summary of a state-of-the-art report. RILEM TC 197-NCM: Nanotechnology in construction materials. *Mater. and Struc.* Vol. 37, Issue 273 (2004), pp. 649-658.
- [35] FRICKE, J.; TILLOTSON, T. Aerogels: production, characterization, and applications, *Thin Solid Films.* Vol. 297, Issue (1 - 2) (1997), pp. 212-223.
- [36] AEGERTER, MA.; LEVENTIS, N.; KOEBEL, MM. (EDS.), in: *Aerogels handbook*, edited by Springer Science + Business Media, New York (2011).
- [37] BAETENS, R., JELLE, B.; GUSTAVSEN, A. Aerogel insulation for building applications: A state-of-the-art review, *Energ. Build.* Vol. 43, Issue 4 (2011), pp. 761-769.
- [38] STAHL, TH.; BRUNNER, S; ZIMMERMANN, M.; GHAZI WAKILI, K. Thermo-hygric properties of a newly developed aerogel based insulation rendering for both exterior and interior applications. *Energy and Buildings* Vol. 44 (2012), pp. 114-117.
- [39] EMPA, Aerogel-based render - A simple and effective way to insulate historical buildings, EMPA - Materials Science & Technology, Media release (Duebendorf, St. Gall, Thun, 18th November 2010).
- [40] SOARES, A; JÚLIO, M., FLORES-COLEN, I.; ILHARCO, L.; BRITO, J de, GASPAS MAR-TINHO, J. Resistência à água de argamassas com incorporação de agregados leves, CLB-MCS Congresso Luso-Brasileiro de Materiais de Construção Sustentáveis, Março 2014, Guimarães.
- [41] KIM, S.; SEO, J.; CHA, J.; KIM, S. Chemical retreating for gel-typed aerogel and insulation performance of cement containing aerogel. *Constru. Build. Mater.* Vol. 20 (2013), pp. 501-505.



**INÊS FLORES-COLEEN**  
Professora Auxiliar  
IST  
Lisboa



**ANTÓNIO SOARES**  
Bolsheiro de investigação  
IST  
Lisboa



**JORGE DE BRITO**  
Professor Catedrático  
IST  
Lisboa