

# VALORIZAÇÃO DE RESÍDUO DE QUARTZO EM BETÃO BRANCO ARQUITETÓNICO: ESTUDO AO NÍVEL DA ARGAMASSA



Ana Mafalda Matos  
Invest. Dout.  
Construct-Labest, FEUP  
Porto  
anamatos@fe.up.pt



Lino Maia  
Investigador Auxiliar  
Construct-Labest, FEUP  
Porto  
linomaia@fe.up.pt



Joana Sousa-  
Coutinho  
Prof. Associada  
Construct-Labest, FEUP  
Porto  
jcouti@fe.up.pt

## SUMÁRIO

A utilização de adições disponíveis localmente é um fator chave para a redução de custos e emissões de CO<sub>2</sub> alocados à produção de betão, particularmente a valorização dos resíduos industriais locais. O presente trabalho avaliou a valorização de um resíduo de mineração, o pó de quartzo (QP), para formulações de betão branco arquitetónico auto-compactável. O QP foi caracterizado e posteriormente procederam estudos de composições com vista a alcançar auto-compactabilidade em argamassas à base de cimento branco, e usando como referência três diferentes *fillers* calcários comerciais. As propriedades no estado fresco, resistividade, resistência mecânica e porosidade acessível água foram aferidas para as diferentes argamassas brancas auto-compactáveis.

**Palavras-chave:** Betão arquitetónico; cimento branco; pó de quartzo; sustentabilidade; valorização de resíduos.

## 1. INTRODUÇÃO

O betão é, atualmente, um material de construção massivo, e não se espera uma alternativa que satisfaça as necessidades legítimas das sociedades em termos de infraestruturas, habitação e melhoria do nível de vida, pelo menos para a geração seguinte. A civilização depende deste material compósito inorgânico, cujas matérias-primas básicas, cimento, agregados e água, se encontram amplamente disponíveis a nível mundial e o tornam pouco

dispendioso. Além disso, endurece na maioria dos ambientes habitáveis, bem como debaixo de água, podendo ser utilizado numa vasta gama de obras de construção.

O cimento Portland (PC) é o ligante hidráulico mais utilizado na produção de betão. O fabrico de PC é sem dúvida o processo com maior consumo energético e com maior intensidade carbónica quando se fabrica betão. A produção de cada tonelada de PC i) gera em média 842 kg de CO<sub>2</sub> [1], ii) consome entre 60 a 130 kg de combustível, e iii) e cerca de 110 kWh de eletricidade [2]. Em 2018, foram produzidas 3,99 mil milhões de toneladas de cimento em todo o mundo [3], e 179,8 milhões de toneladas na Europa [4].

Como referido por Aitcin: "*Os seres humanos não podem viver sem cimento Portland; é assim importante que o utilizem adequadamente, dentro de uma perspetiva de desenvolvimento sustentável*" [5].

Uma estratégia eficaz para reduzir a pegada ecológica da produção do PC é a sua substituição parcial por outros materiais, conhecidos como adições. As adições podem ser materiais quase inertes, normalmente designados por *fillers* (adições Tipo I) ou materiais com propriedades hidráulicas latentes ou pozolânicas (adições Tipo II). As três adições mais utilizadas a nível mundial são escória granulada moída de alto-forno (GGBS), cinzas volantes (FA) e *filler* calcário (LF). Contudo, a disponibilidade destes desejáveis substitutos parciais de PC, principalmente GBFS e FA, é relativamente modesta tendo em conta a produção real de cimento.

A adição GGBS apresenta propriedades hidráulicas latentes, permitindo a formação de silicatos de cálcio hidratados e aluminatos, mas a reação hidráulica é excecionalmente lenta quando utilizada isoladamente e, portanto, sem aplicação prática. A ativação pode ser feita, entre outros, por PC, pois à medida que o pH sobe, para um valor de 12 (ou mais), são ativadas as reações de hidratação da escória. Atualmente, as fábricas de cimento e as indústrias de produção de betão já consomem como adição, mais 90% da GGBS disponível.

As FA apresentam propriedades pozolânicas e consistem essencialmente em sílica e alumina. Apesar da disponibilidade mundial de FA ser superior ao GGBS, cerca de 900 Mt/ano, apenas aproximadamente um terço dessa quantidade é atualmente aplicada na produção de cimento e betão. Isto deve-se principalmente às propriedades inconstantes de FA que afetam a sua qualidade e adequação para ser utilizado como adição [6]. Além disso, a utilização de carvão para a produção de energia está a ser reduzida devido à necessidade global de redução da emissão de carbono.

O LF é amplamente utilizado nos países europeus, e tem benefícios técnicos em algumas propriedades dos materiais à base de cimento, tais como [7]: trabalhabilidade, densidade, compacidade e permeabilidade, capilaridade, exsudação e risco de fissuração. Os LF podem melhorar a hidratação do cimento Portland, uma vez que atuam como centros de nucleação. No entanto, o LF deriva de fontes naturais não renováveis, e o processo de produção exige consumo de energia necessário à obtenção das propriedades padrão exigidas.

Alternativas às adições convencionais têm sido escrutinadas pela comunidade científica nas últimas décadas. Materiais passíveis de substituir parcialmente o PC podem ser subprodutos/resíduos da agricultura e da indústria. Muitos destes resíduos, que são atualmente eliminados em aterro e não tem qualquer valor acrescentado, têm potencial para serem introduzidos novamente na cadeia de valor e constituir uma oportunidade para valorizar, reutilizar, reciclar, contribuindo para uma economia circular. As adições alternativas devem ser compostas principalmente por silício e alumínio, pois geralmente os materiais ricos nesses

elementos apresentam várias vantagens: permitem bombeamento fácil, melhor acabamento, redução da segregação, por vezes melhorando a resistência, reduzindo a permeabilidade e durabilidade como o ataque por sulfatos, aumentando a resistência ao gelo-degelo e a reações químicas nocivas [8]. A reciclagem/valorização de vários tipos de resíduos em cimento/betão é bem discutida em [9].

Consequentemente, no CONSTRUCT-LABEST, na última década foram realizados vários estudos acerca da viabilidade da reciclagem/valorização de resíduos ou subprodutos como adições alternativas para betão estrutural, através da captação de financiamento competitivo (PTDC/ECM/098117/2008-*Adições provenientes de resíduos para betão estrutural sustentável*, PTDC/ECM/122446/2010-*Betões de elevado desempenho reforçado com fibras em soluções inovadoras: conceção, caracterização e controlo de qualidade*, POCI-01-0145-FEDER-031777-*Nova geração de compósitos cimentícios de ultraelevado desempenho para a reabilitação e reforço de estruturas*, entre outros). Vários desses resíduos ou subprodutos apresentaram potencial para serem incorporados em materiais à base de cimento, sem prejudicar a trabalhabilidade, endurecimento, desempenho mecânico ou durabilidade, tais como resíduos de vidro moídos [10]–[14], resíduos de lamas de pedreiras graníticas [15], [16], cinzas da incineração de resíduos de madeira [17], resíduos de pó de cortiça [18], cinzas da incineração de resíduos de cortiça [19], catalisador exausto de *cracking* catalítico [20], resíduos de construção e demolição moídos [21], cinzas da incineração de resíduos sólidos urbanos [22], entre outros [23]. Acima de tudo, a capacidade do betão para incorporar resíduos proporciona uma oportunidade chave para impulsionar a utilização eficiente dos recursos, tal como pretendido pelo Pacto Verde Europeu e Objetivos de Desenvolvimento Sustentável da Agenda 2030, e contribuindo para uma economia mais circular e competitiva. Contudo, muitos outros resíduos podem ser valorizados.

## 1.1 Importância da investigação e objetivos

O pó de quartzo, um resíduo proveniente da produção e transformação de quartzo, apresenta coloração branca, e uma composição química de cerca de 99% de sílica. O pó de quartzo é considerado quimicamente inerte à temperatura ambiente, mas não é completamente inerte a temperaturas elevadas e pH elevados [24].

Quando utilizadas em materiais cimentícios, os materiais inertes ou quase inertes têm pouca relevância sob o ponto de vista químico [25]. Contudo, têm efeitos físicos e podem também acelerar a reação de hidratação do clínquer, pois os *fillers* fornecerem mais locais de nucleação para o crescimento do silicato de cálcio hidratados (CSH) [26]–[28]. Bentz *et al.* [15] demonstraram que a hidratação cimento foi acelerada e tempo de presa reduzido pelo *filler* calcário e pó de quartzo [29].

O pó de quartzo é normalmente utilizado no fabrico de betão de elevado e ultraelevado desempenho. Todavia podem ser necessárias formulações de cimento branco devido aos requisitos de cor para aplicações arquitetónicas. Assim a cor branca do QP pode ser uma mais-valia para fins arquitetónicos, sendo essa solução pouca escrutinada na literatura.

O cimento Portland branco caracteriza-se por teores de ferro e álcalis mais baixos e teor de cal livre mais elevado relativamente aos cimentos Portland convencionais. O cimento branco é normalmente mais fino pois uma maior finura aumenta a brancura, proporcionando, consequentemente, tempos de presa menores e maior resistência mecânica nas primeiras idades. Estas particularidades do cimento não devem afetar negativamente o desempenho do produto final, exigindo uma seleção e combinação adequadas dos materiais constituintes na fase de conceção da composição.

O betão arquitetónico em geral tem menor teor de agregados e a sua dimensão máxima é limitada. A dosagem de material fino é aumentada e colmatada com cimento e adições. A substituição parcial do cimento Portland branco por adições de cor branca, é benéfica sob o ponto de vista económico, técnico e ambiental. Todavia, em Portugal e em muitos outros países, as adições brancas são escassas. A utilização de adições disponíveis localmente é um fator chave para a redução de custos e emissões de CO<sub>2</sub> alocados à produção de betão, particularmente a valorização dos resíduos industriais locais, tais como resíduos de mineração. Esta solução contribui numa forma integrada para alcançar betões mais sustentáveis e circulares.

O presente trabalho avaliou a incorporação de um resíduo de mineração, o pó de quartzo (QP), de uma empresa local, para formulações de betão branco auto-compactável. O QP foi caracterizado e posteriormente seguiram-se estudos de composições de argamassas de cimento Portland branco com vista a alcançar auto-compactabilidade, usando como referência três diferentes *fillers* calcários comerciais (designados por BC, EC e BL). Assim foram produzidas quatro argamassas brancas auto-compactáveis (ABAC), sendo a fração ligante constituída por cimento branco e um *filler* (10% da massa de cimento). As propriedades no estado fresco (viscosidade e deformabilidade), evolução da resistividade, resistência mecânica, porosidade acessível água, foram aferidas nas diferentes ABAC. Por último, produziu-se um protótipo de elemento de fachada arquitetónico com a ABAC com QP, demonstrando a sua aplicabilidade.

## 2. MATERIAIS E MÉTODOS

### 2.1 Materiais Constituintes

O cimento Portland do tipo CEM II A-L 52.5 R foi utilizado como ligante. Como adições tipo I utilizaram-se três *fillers* calcários disponíveis no mercado nacional e amplamente utilizados em Portugal (neste estudo designados por BC, EC e BL) e o pó de quartzo. O adjuvante utilizado foi um superplastificante à base de carboxilatos modificados. Como agregado utilizou-se uma areia fina com um diâmetro máximo de 1 mm, massa volúmica de 2580 kg/m<sup>3</sup>. A avaliação da cor das matérias-primas foi registada fotograficamente e apresenta-se na Figura 1. Como se pode verificar, apenas o cimento apresenta cor branca, os *fillers* comerciais apresentam sub tons de cor de laranja. A areia fina utilizada apesar de ter um tom mais escuro, tem pouca influência na cor, sendo esta praticamente toda controlada pela pasta cimentícia (como se verifica no ensaio de brancura na secção 3.4).

O QP foi caracterizado com base nos ensaios previstos para adições, nomeadamente, massa volúmica, superfície específica (Método de Blaine) e análise granulométrica (Método laser). Os valores obtidos foram 2660 kg/m<sup>3</sup> e 1320 cm<sup>2</sup>/g e d<sub>90</sub>=130 micrómetros. A dimensão das partículas de QP é significativamente superior aos *fillers* calcários (d<sub>90</sub>~20-40 micrómetros) e a superfície específica é inferior.

### 2.2 Estudo de composições

Foram produzidas quatro ABAC, cada uma delas incorporando um *filler* distinto (BC, EC e BL) e outra incorporando QP. Todas as ABAC, ABAC-QP, ABAC-BC, ABAC-BL e ABAC-EC, foram concebidas com uma mistura binária, cimento+*filler* ou cimento+QP, sendo o *filler* /QP

incorporado numa proporção de 10% em relação à massa do cimento. As composições das ABAC apresentam se no Quadro 1.

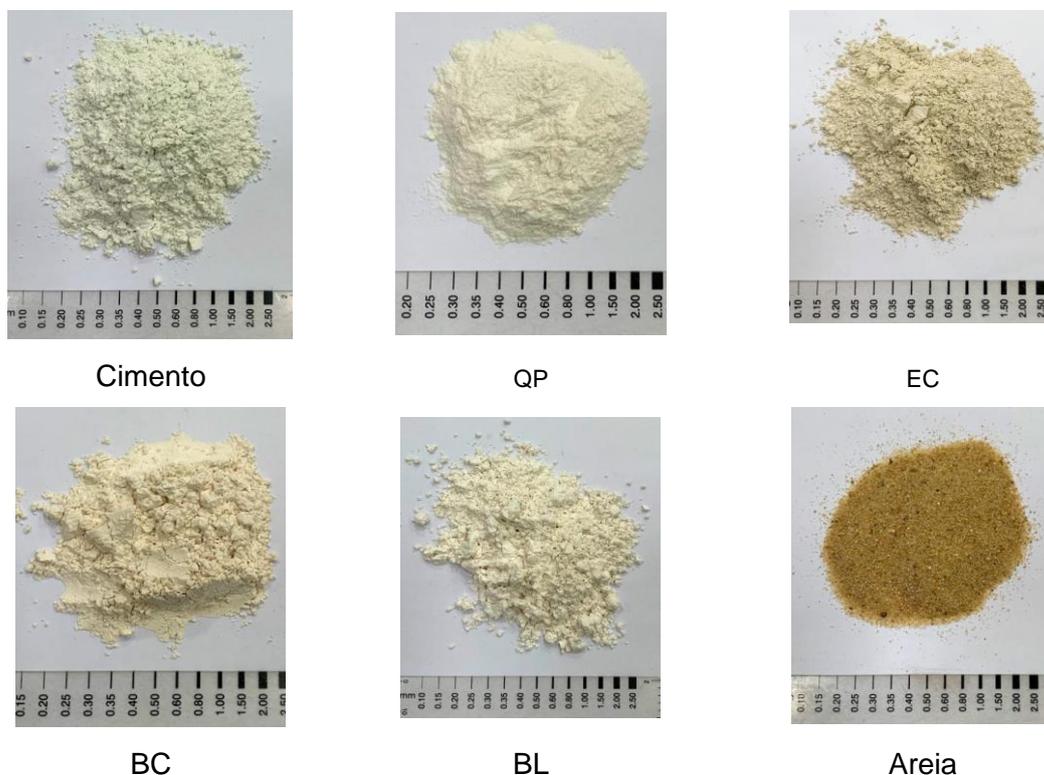


Figura 1 – Materiais constituintes das ABAC (fotografias tiradas com luz natural).

Quadro 1 – Composições ABAC concebidas e estudadas

<i>Materiais constituintes (kg/m<sup>3</sup>)</i>	<i>ABAC-QP</i>	<i>ABAC-BC</i>	<i>ABAC-BL</i>	<i>ABAC-EC</i>
Cimento	650	650	650	650
Adição (QP/BC/BL/EC)	65	65	65	65
Areia	1200	1200	1200	1200
SP	6,00	6,00	6,50	6,00
Água	190	190	190	190

### 2.3 Caracterização das argamassas brancas auto-compactáveis

Para cada ABAC realizaram-se os ensaios de Espalhamento com Mini-Cone, Tempo de Escoamento no mini Funil em V, Resistividade Elétrica, Resistência Mecânica, Porosidade Acessível à água. A síntese do programa experimental realizado sob as ABAC encontra-se no Quadro 2.

**Quadro 2. Síntese do programa experimental**

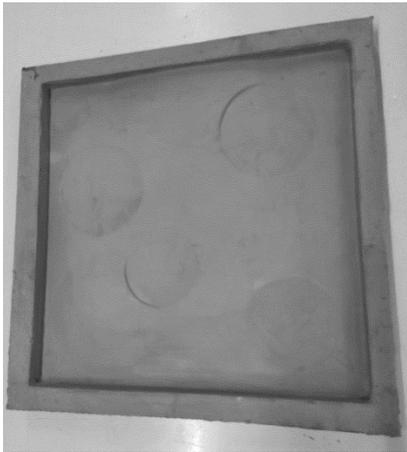
<i>Denominação do Ensaio</i>	<i>Referência normativa ou procedimento</i>	<i>Cura</i>	<i>Idade à data de ensaio (dias)</i>	<i>Número de provetes para cada idade</i>	<i>Dimensão e geometria dos provetes (mm<sup>3</sup>)</i>
Espalhamento	EFNARC				
Tempo de escoamento no funil em V	EFNARC				
Porosidade acessível à água	NT Build 492	Em água a 20±2°C	28	3	Cilíndricos Diâmetro = 50 mm diâmetro, altura=30 mm
Resistividade elétrica	Método dos 2 elétrodos [30] (ver Figura 2)		2, 7, 14, 21 e 28	3	Prismáticos 40 x 40 x 160
Resistência mecânica	NP EN 196-1		7 e 28	3	Prismáticos 40 x 40 x 160



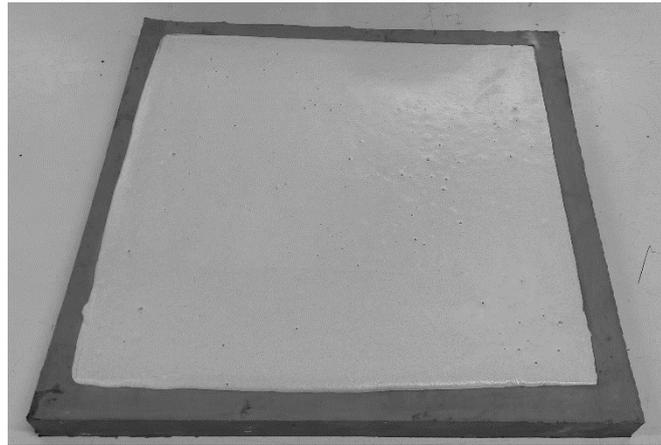
**Figura 2 – Provet ABAC – ensaio de resistividade elétrica.**

#### **2.4 Protótipo de elemento de fachada**

Após o estudo realizado nas secções anteriores e considerando os resultados obtidos (apresentados e discutidos no Capítulo 3), foi produzido um protótipo de elementos de fachada arquitetónicos com a ABAC-QP. Foi utilizado um molde de silicone com área 39x39 cm<sup>2</sup> e uma espessura média de 2 cm (ver Figura 3-a). A argamassa foi produzida numa misturadora Hobart e num volume de 3.2 l. Após a produção o molde foi enchido sem qualquer tipo de vibração devido à auto-compactabilidade da argamassa (ver Figura 3-b).



a)



b)

**Figura 3 – a) Molde; b) ABAC-QP após moldagem.**

### **3. RESULTADOS E DISCUSSÃO**

#### **3.1 Estado fresco**

A Figura 4 apresenta os espalhamentos obtidos para as argamassas em estudo e, como se pode perceber, todas as argamassas apresentaram auto-compactabilidade sem qualquer evidência de segregação. A Figura 5 apresenta o tempo de escoamento no funil em V ( $T_{\text{funnel}}$ ) versus o diâmetro de espalhamento ( $D_{\text{flow}}$ ) obtido para as mesmas argamassas. As gamas observadas de  $D_{\text{flow}}$  e  $T_{\text{funnel}}$  parecem ser adequadas, pois estão nos valores-alvo de  $D_{\text{flow}}$  e  $T_{\text{funnel}}$  (de 260 mm e 10 s, respectivamente), de acordo com Okamura et al. [31] e EFNARC. A incorporação de QP, na mesma dosagem dos *fillers* comerciais de referência, apresentou um desempenho equivalente e não impactou a auto-compactabilidade.

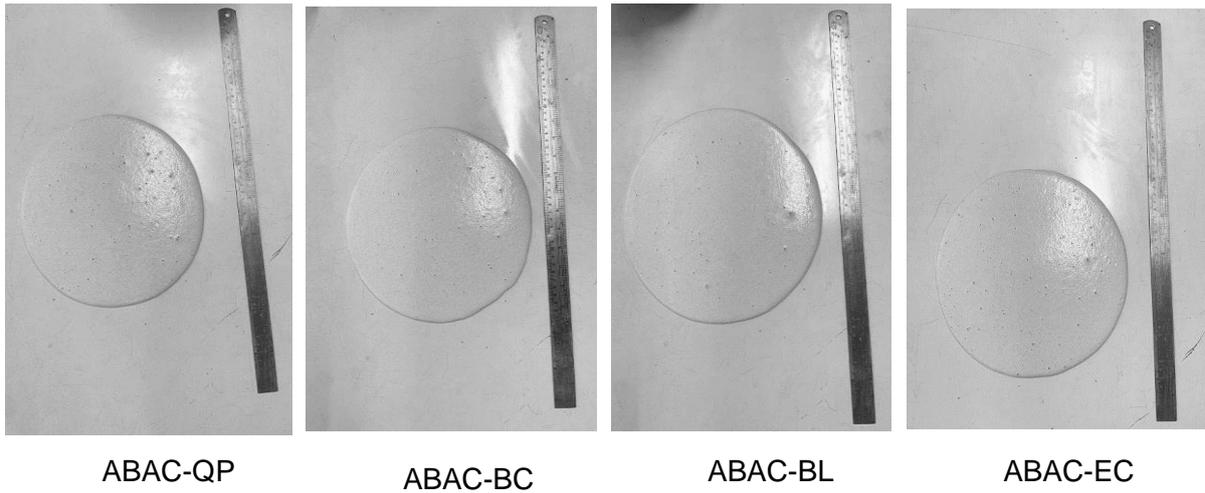


Figura 4 – Diâmetros de espalhamento das ABAC estudadas.

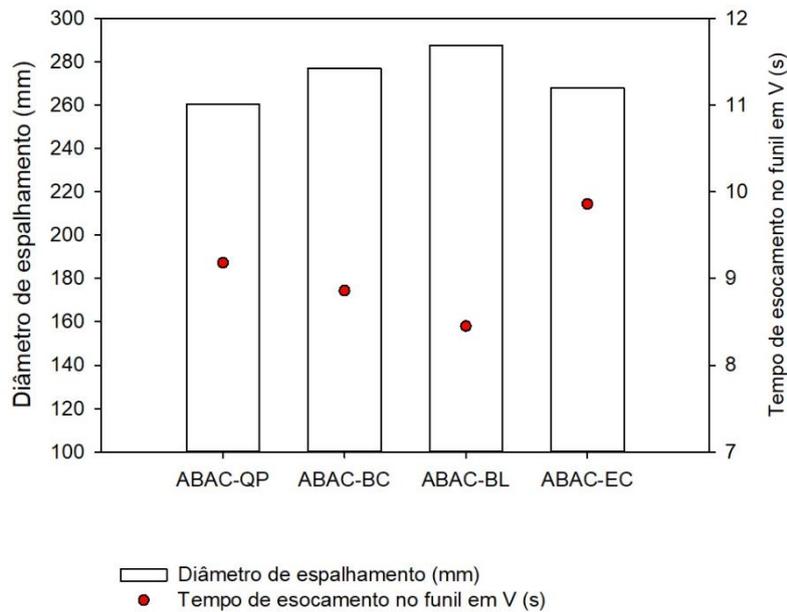


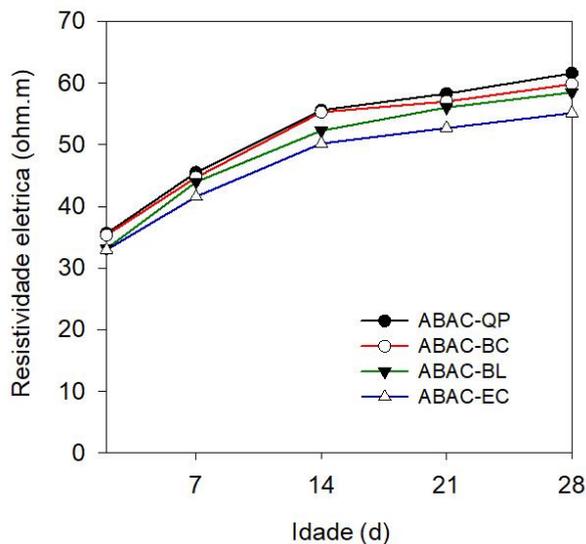
Figura 5 – Diâmetros de espalhamento e tempo de escoamento no funil em V das ABAC estudadas.

### 3.2 Resistividade elétrica e porosidade acessível à água

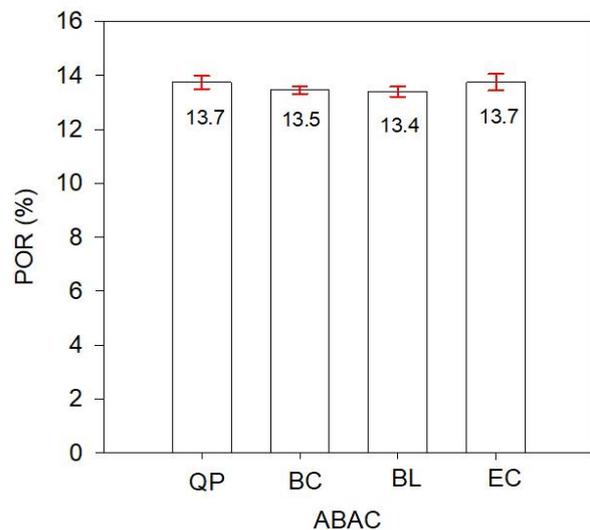
A Figura 6 apresenta o desenvolvimento da resistividade elétrica até 28 dias das ABAC. Como esperado, a resistividade elétrica aumentou com a idade devido à reação de hidratação contínua do cimento, levando a uma rede de poros mais finos com menos conectividade. Os resultados da resistividade aos 28 dias variaram entre 55 a 61  $\Omega$  m, o que indica uma matriz compacta. Como referência, após 10 anos, espera-se que um betão denso incorporando mais de 5% de sílica de fumo, submerso a 20 °C, exiba uma resistividade de 300 a 1000  $\Omega$  m [47]. A ABAC-QP exibiu o maior ganho em resistividade atingindo 45, 56 e 61  $\Omega$  m após 7, 14 e 28 dias, respetivamente. A Figura 6 também sugere que a resistividade de todas as argamassas

continuará a aumentar ainda para além dos 28 dias. De acordo com Sengul [32], e baseados nos resultados de resistividade elétrica obtidos aos 28 dias de idade, as ABAC desenvolvidas consideram-se muito resistentes à penetração de cloretos (Resistividade > 35  $\Omega \cdot m$  aos 28 dias de idade).

A porosidade acessível à água de todas as ABAC foi cerca de 13%, conforme ilustrado na Figura 7. O QP não alterou a porosidade acessível à água, mantendo um desempenho similar a outros *fillers* calcários comerciais. Contudo, deve salientar-se que a porosidade permeável à água não pode ser diretamente comparada à porosidade total obtida por porosimetria de mercúrio (MIP) [33]; sendo a porosidade permeável à água geralmente significativamente maior do que a porosidade total dada pelo MIP [33]. Os resultados da porosidade permeável à água também variam com a eficiência da técnica de saturação utilizada [34]. A técnica de saturação por vácuo é considerada o método de saturação mais eficiente, relativamente à saturação por água fria ou fervente [35].



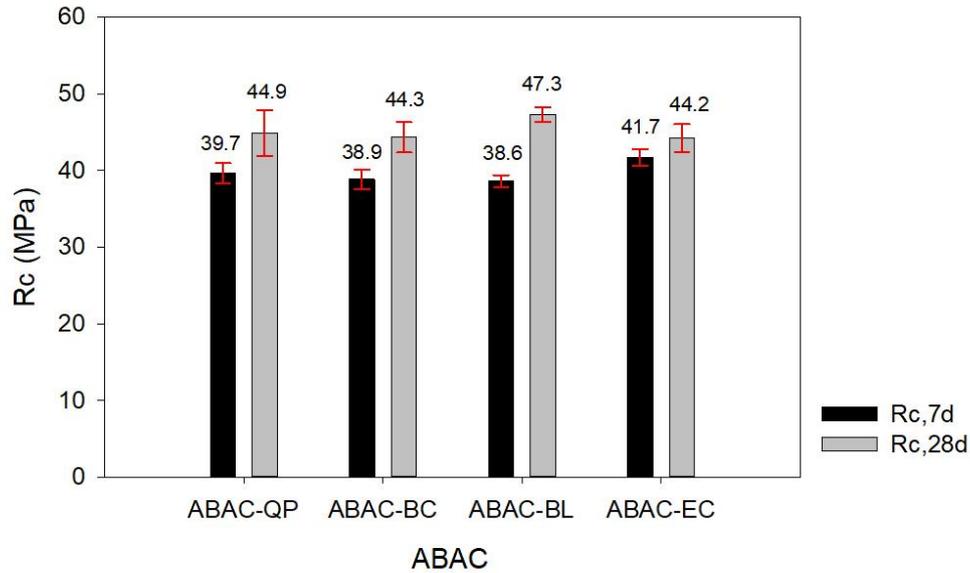
**Figura 6 – Evolução da resistividade elétrica entre 2 e 28 dias das argamassas estudadas.**



**Figura 7 – Porosidade acessível à água (POR) das argamassas estudadas.**

### 3.3 Resistência mecânica

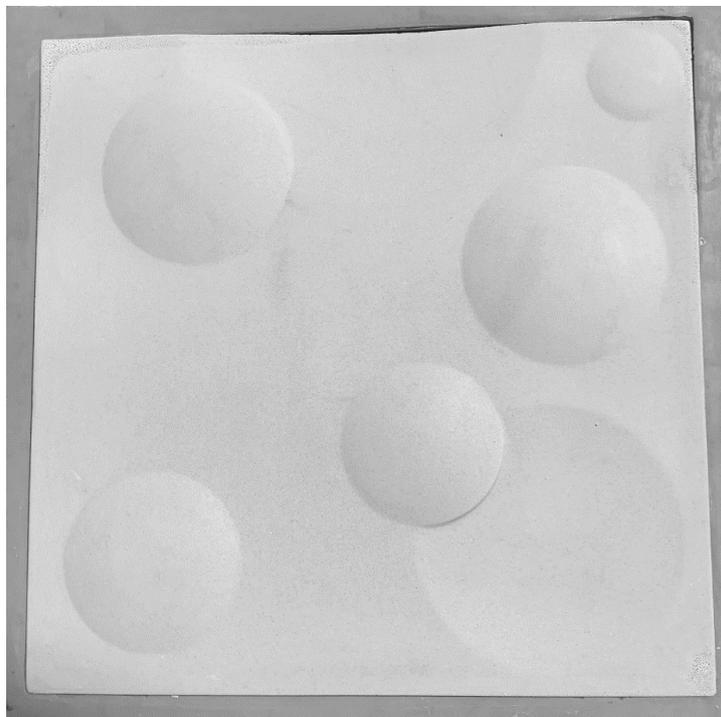
A resistência à compressão das argamassas estudadas apresenta-se na Figura 8. As ABAC apresentaram desempenhos muito similares, com resistências à compressão entre 38-42 MPa aos sete dias e 44-47 MPa aos 28 dias. A evolução da resistência à compressão entre os 7 e 28 dias foi cerca de 10%, o que seria esperado pois tanto o efeito dos *fillers* calcários como do QP são maioritariamente físicos.



**Figura 8 – Resistência à compressão aos 7 e 28 dias de idade das ABAC estudadas.**

### 3.4 Protótipo

O elemento de fachada apresentou uma cor branca e um acabamento perfeito tal como apresentado na Figura 9. Foi desmoldado passado 24h sem qualquer dificuldade. Como ponto de melhoria pode referir se o elevado peso próprio.



**Figura 9 – Aspeto do elemento de fachada.**

## 4. CONCLUSÕES

O presente trabalho avaliou a incorporação de um resíduo de mineração, o pó de quartzo (QP), de uma empresa local, em formulações de ABAC. A performance das ABAC-QP foi comparada com argamassas equivalentes incorporando outros *fillers* calcários comerciais amplamente utilizados em Portugal. Apesar do QP apresentar partículas de maior dimensão, as propriedades no estado fresco, deformabilidade e viscosidade, foram similares às argamassas de referência com a mesma dosagem de água e adjuvante. No que se refere a propriedades de transporte, a porosidade acessível à água foi muito similar em todas as argamassas e a resistividade elétrica foi ligeiramente superior nas ABAC-QP. A resistência à compressão foi também idêntica em todas as argamassas.

## AGRADECIMENTOS

Este trabalho foi apoiado financeiramente por: Financiamento de Base-UIDB/04708/2020 e Financiamento Programático-UIDP/04708/2020 do CONSTRUCT - Instituto de I&D em Estruturas e Construções- financiado por fundos nacionais através da FCT/MCTES (PIDDAC); e pela FCT-Fundação para a Ciência e a Tecnologia através do Estímulo ao Emprego Científico 2021.01765.CEECIND (chamada individual) e CEECINST/00049/2018 (chamada institucional). Os autores gostariam de agradecer ao aluno George Moraes. Agradecimentos também são devidos à Secil, CHRYSO, Sika e Quarpor pela colaboração e fornecimento das matérias-primas.

## REFERÊNCIAS

- [1] K. L. Scrivener, V. M. John, and E. M. Gartner, “Eco-efficient cements: Potential economically viable solutions for a low-CO<sub>2</sub> cement-based materials industry,” *Cement and Concrete Research*, vol. 114, pp. 2–26, Dec. 2018, doi: 10.1016/J.CEMCONRES.2018.03.015.
- [2] “Key Facts & Figures.” <https://cembureau.eu/about-our-industry/key-facts-figures/> (accessed Jul. 08, 2022).
- [3] “world-cement-production-pie-2018.png (1020×853).” <https://cembureau.eu/media/bhvhn4dw/world-cement-production-pie-2018.png> (accessed Jul. 08, 2022).
- [4] “main-world-producers-table.png (757×574).” <https://cembureau.eu/media/r2nbrylj/main-world-producers-table.png> (accessed Jul. 08, 2022).
- [5] A. Pierre-Claude, “Binders for durable and sustainable concrete,” *Binders for Durable and Sustainable Concrete*, pp. 1–500, Jan. 2007, doi: 10.1201/9781482265767/BINDERS-DURABLE-SUSTAINABLE-CONCRETE-PIERRE-CLAUDE-AITCIN.

- [6] K. L. Scrivener, V. M. John, and E. M. Gartner, "Eco-efficient cements: Potential economically viable solutions for a low-CO<sub>2</sub> cement-based materials industry," *Cement and Concrete Research*, vol. 114, pp. 2–26, Dec. 2018, doi: 10.1016/j.cemconres.2018.03.015.
- [7] V. Bonavetti, H. Donza, G. Menéndez, O. Cabrera, and E. F. Irassar, "Limestone filler cement in low w/c concrete: A rational use of energy," *Cement and Concrete Research*, vol. 33, no. 6, pp. 865–871, 2003, doi: 10.1016/S0008-8846(02)01087-6.
- [8] E. Aprianti S, "A huge number of artificial waste material can be supplementary cementitious material (SCM) for concrete production – a review part II," *Journal of Cleaner Production*, vol. 142, pp. 4178–4194, Jan. 2017, doi: 10.1016/J.JCLEPRO.2015.12.115.
- [9] R. Siddique and P. Cachim, *Waste and supplementary cementitious materials in concrete: Characterisation, properties and applications*. Elsevier, 2018. doi: 10.1016/C2016-0-04037-8.
- [10] J. S.-C. Telma Ramos, Ana Mafalda Matos, Francisco Araújo, "Resíduo de Vidro – A pozolana do futuro," *Materiais de Construção*, vol. March, pp. 30–38, 2013.
- [11] A. M. Matos and J. Sousa Coutinho, "Waste glass powder in cement: macro and micro scale study," *Advances in Cement Research*, vol. 28, no. 7, pp. 423–432, 2016, doi: 10.1680/jadcr.14.00025.
- [12] A. M. Matos and J. Sousa-Coutinho, "Durability of mortar using waste glass powder as cement replacement," *Construction and Building Materials*, vol. 36, pp. 205–215, Nov. 2012, doi: 10.1016/J.CONBUILDMAT.2012.04.027.
- [13] A. M. Matos, T. Duarte, S. Nunes, and J. Sousa Coutinho, "BAC com resíduo de vidro cofrado com CPF," *BE2012 - Encontro Nacional Betão Estrutural*, pp. 1–10, 2012.
- [14] S. Nunes, A. M. Matos, T. Duarte, H. Figueiras, and J. Sousa-Coutinho, "Mixture design of self-compacting glass mortar," *Cement and Concrete Composites*, vol. 43, pp. 1–11, 2013, doi: 10.1016/j.cemconcomp.2013.05.009.
- [15] A. M. Matos, T. Ramos, and J. Sousa-Coutinho, *Strength, ASR and chloride penetration of mortar with granite waste powder*, vol. 634. 2015. doi: 10.4028/www.scientific.net/KEM.634.139.
- [16] T. Ramos, A. M. Matos, B. Schmidt, J. Rio, and J. Sousa-Coutinho, "Granitic quarry sludge waste in mortar: Effect on strength and durability," *Construction and Building Materials*, vol. 47, pp. 1001–1009, 2013, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2013.05.098.
- [17] T. Ramos, A. M. Matos, and J. Sousa-Coutinho, "Mortar with wood waste ash: Mechanical strength carbonation resistance and ASR expansion," *Construction and Building Materials*, vol. 49, pp. 343–351, 2013, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2013.08.026.
- [18] A. M. Matos, S. Nunes, and J. Sousa-Coutinho, "Cork waste in cement based materials," *Materials and Design*, vol. 85, pp. 230–239, 2015, doi: 10.1016/j.matdes.2015.06.082.

- [19] T. Ramos, A. M. Matos, and J. Sousa-Coutinho, "Strength and durability of mortar using cork waste ash as cement replacement," *Materials Research*, vol. 17, no. 4, pp. 893–907, 2014, doi: 10.1590/S1516-14392014005000092.
- [20] A. M. Matos, S. Nunes, C. Costa, and J. L. Barroso-Aguiar, "Spent equilibrium catalyst as internal curing agent in UHPFRC," *Cement and Concrete Composites*, vol. 104, Nov. 2019, doi: 10.1016/J.CEMCONCOMP.2019.103362.
- [21] S. Rocha and J. Sousa-Coutinho, "Construction and demolition waste as partial cement replacement," <https://doi.org/10.1680/jadcr.16.00132>, vol. 31, no. 9, pp. 411–422, Aug. 2019, doi: 10.1680/JADCR.16.00132.
- [22] A. Mafalda Matos and J. Sousa-Coutinho, "Municipal solid waste incineration bottom ash recycling in concrete: Preliminary approach with Oporto wastes," *Construction and Building Materials*, vol. 323, p. 126548, Mar. 2022, doi: 10.1016/J.CONBUILDMAT.2022.126548.
- [23] A. M. Matos, T. Ramos, and J. Sousa-Coutinho, "Non-conventional additions from agricultural waste," in *Sustainable Construction Materials and Technologies*, 2013, vol. 2013-Augus.
- [24] P. Suraneni and J. Weiss, "Examining the pozzolanicity of supplementary cementitious materials using isothermal calorimetry and thermogravimetric analysis," *Cement and Concrete Composites*, vol. 83, pp. 273–278, Oct. 2017, doi: 10.1016/J.CEMCONCOMP.2017.07.009.
- [25] E. H. Kadri, S. Aggoun, G. de Schutter, and K. Ezziane, "Combined effect of chemical nature and fineness of mineral powders on Portland cement hydration," *Materials and Structures/Materiaux et Constructions*, vol. 43, no. 5, pp. 665–673, Jun. 2010, doi: 10.1617/S11527-009-9519-6/FIGURES/12.
- [26] T. Oey, A. Kumar, J. W. Bullard, N. Neithalath, and G. Sant, "The Filler Effect: The Influence of Filler Content and Surface Area on Cementitious Reaction Rates," *Journal of the American Ceramic Society*, vol. 96, no. 6, pp. 1978–1990, Jun. 2013, doi: 10.1111/JACE.12264.
- [27] W. A. Gutteridge and J. A. Dalziel, "Filler cement: The effect of the secondary component on the hydration of Portland cement: Part 2: Fine hydraulic binders," *Cement and Concrete Research*, vol. 20, no. 6, pp. 853–861, Nov. 1990, doi: 10.1016/0008-8846(90)90046-Z.
- [28] E. Berodier and K. Scrivener, "Understanding the Filler Effect on the Nucleation and Growth of C-S-H," *Journal of the American Ceramic Society*, vol. 97, no. 12, pp. 3764–3773, Dec. 2014, doi: 10.1111/JACE.13177.
- [29] D. P. Bentz, C. F. Ferraris, S. Z. Jones, D. Lootens, and F. Zunino, "Limestone and silica powder replacements for cement: Early-age performance," *Cement and Concrete Composites*, vol. 78, pp. 43–56, Apr. 2017, doi: 10.1016/J.CEMCONCOMP.2017.01.001.

- [30] R. Polder *et al.*, "Test methods on site measurement of resistivity of concrete – A RILEM TC-154 technical recommendation," *Materials and Structures*, vol. 33, pp. 603–611, 2000.
- [31] Hajime Okamura and Masahiro Ouchi, "Self-Compacting Concrete," *Journal of Advanced Concrete Technology*, vol. 1, no. 1, pp. 5–15, Oct. 2003, doi: 10.3151/JACT.1.5.
- [32] O. Sengul, "Use of electrical resistivity as an indicator for durability," *Construction and Building Materials*, vol. 73, pp. 434–441, Dec. 2014, doi: 10.1016/J.CONBUILDMAT.2014.09.077.
- [33] W. Wang, J. Liu, F. Agostini, C. A. Davy, F. Skoczylas, and D. Corvez, "Durability of an Ultra High Performance Fiber Reinforced Concrete (UHPFRC) under progressive aging," *Cement and Concrete Research*, vol. 55, pp. 1–13, Jan. 2014, doi: 10.1016/J.CEMCONRES.2013.09.008.
- [34] A. Tafraoui, G. Escadeillas, and T. Vidal, "Durability of the Ultra High Performances Concrete containing metakaolin," *Construction and Building Materials*, vol. 112, pp. 980–987, 2016, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2016.02.169.
- [35] Md. Safiuddin and N. Hearn, "Comparison of ASTM saturation techniques for measuring the permeable porosity of concrete," *Cement and Concrete Research*, vol. 35, no. 5, pp. 1008–1013, May 2005, doi: 10.1016/J.CEMCONRES.2004.09.017.