

Valorização de resíduos de biomassa e da extração de pedra natural no fabrico de betão autocompactável

Valorisation of biomass ash and granite powder in the production of self-compacting concrete

Gemma Rojo-López

Sandra Nunes

Fernando Martínez-Abella

Belén González-Fonteboa

Resumo

O presente trabalho visa explorar a viabilidade da incorporação simultânea de cinzas da biomassa e de pó-de-pedra em betão autocompactável, ambos resíduos gerados por setores industriais instalados na Euroregião Galiza-Norte de Portugal. Foi desenvolvido um programa experimental segundo um plano fatorial, ao nível da argamassa, como uma fase do estudo que antecede o estudo ao nível do betão. Para cada mistura do plano, foram analisadas diversas propriedades da argamassa, nomeadamente, para caraterizar a respetiva trabalhabilidade, resistência mecânica e durabilidade. Com este estudo demonstrou-se que o pó-de-pedra e a cinza da biomassa podem ser incorporados em conjunto para produzir BACs de elevada deformabilidade, sem risco de segregação. Simultaneamente, ao substituir uma parte do cimento por metacaulino foi possível melhorar significativamente as propriedades do BAC no estado endurecido (maior resistência à compressão, maior resistividade e menor porosidade acessível à água), enquanto se reduzem as emissões de CO₂ pelo uso de menos cimento.

Abstract

The present work aims to explore the feasibility of incorporating biomass ash and granite powder, wastes generated by two industrial sectors operating in the Galicia-North of Portugal Euroregion, in self-compacting concrete. An experimental program was developed according to a factorial plan, at the mortar level, as a step before the study at the concrete level. For each mixture in the plan, several properties of the mortar were analysed, namely to characterise the workability, mechanical strength and durability. This study shows granite powder and biomass ash can be incorporated together to produce SCCs of high deformability, without risk of segregation. At the same time, by replacing a fraction of the cement with metakaolin, it was possible to significantly improve the properties of SCC in the hardened state (higher compressive strength, higher resistivity and lower porosity accessible to water), while reducing CO₂ emissions due to lower cement content.

Palavras-chave: Betão autocompactável (BAC) / Cinza da biomassa / Pó-de-pedra / Metacaulino

Keywords: Self-compacting concrete (SCC) / Biomass ash / Granite powder / Metakaolin

Gemma Rojo-López

Department of Construction Technology
University of A Coruña
A Coruña, Espanha
gemma.rojo@udc.es

Sandra Nunes

CONSTRUCT/FEUP
Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto
Porto, Portugal
snunes@fe.up.pt

Fernando Martínez-Abella

Department of Construction Technology
University of A Coruña
A Coruña, Espanha
fernando.martinez.abella@udc.es

Belén González-Fonteboa

Department of Construction Technology
University of A Coruña
A Coruña, Espanha
bfonteboa@udc.es

Aviso legal

As opiniões manifestadas na Revista Portuguesa de Engenharia de Estruturas são da exclusiva responsabilidade dos seus autores.

Legal notice

The views expressed in the Portuguese Journal of Structural Engineering are the sole responsibility of the authors.

ROJO-LÓPEZ, G. [et al.] – Valorização de resíduos de biomassa e da extração de pedra natural no fabrico de betão autocompactável. *Revista Portuguesa de Engenharia de Estruturas*. Ed. LNEC. Série III. n.º 9. ISSN 2183-8488. (março 2019) 17-26.

1 Introdução

As propriedades de um betão autocompactável (BAC), tanto no estado fresco como no estado endurecido, são determinadas pelas características do esqueleto sólido formado pelos agregados, o volume de pasta e a composição da pasta. Para a definição da composição da pasta os estudos ao nível da argamassa, com recurso a areia normalizada, têm provado ser bastante úteis. Após otimizar a composição da pasta, ao nível da argamassa, é necessário realizar apenas um número limitado de ensaios ao nível do betão para ajustar o conteúdo em agregados e a proporção entre eles. Estes estudos, tanto ao nível da argamassa como do betão, beneficiam com o uso de técnicas estatísticas para o planeamento das experiências (com o recurso a planos fatoriais), a análise dos dados e o ajuste de modelos numéricos através de regressão multilinear [1].

Para além de controlar a trabalhabilidade, a composição da pasta tem também uma grande influência nas propriedades do betão em idades jovens e a longo prazo, incluindo na durabilidade. Desta forma, de modo a controlar o aumento da temperatura nas idades jovens e manter o teor de cimento num nível aceitável, o conteúdo em finos pode conter uma percentagem significativa de adições tipo I ou II. No BAC utilizam-se frequentemente filler calcário, cinzas volantes e escórias de alto-forno como materiais suplementares, em função da disponibilidade local. Outros materiais mais finos que estes como, por exemplo, a sílica de fumo, o metacaulino ou a cinza de casca de arroz podem também ser utilizados quando são exigidas propriedades mecânicas e de durabilidade melhoradas. Dada a disponibilidade relativamente limitada de alguns destes materiais a nível local e mesmo mundial, há que explorar novas vias e investigar em termos de aplicabilidade outro tipo de resíduos e subprodutos de diversas indústrias para substituir parcialmente o clínquer Portland e tornar a indústria de construção mais “verde”.



Figura 1 Euroregião Galiza-Norte de Portugal

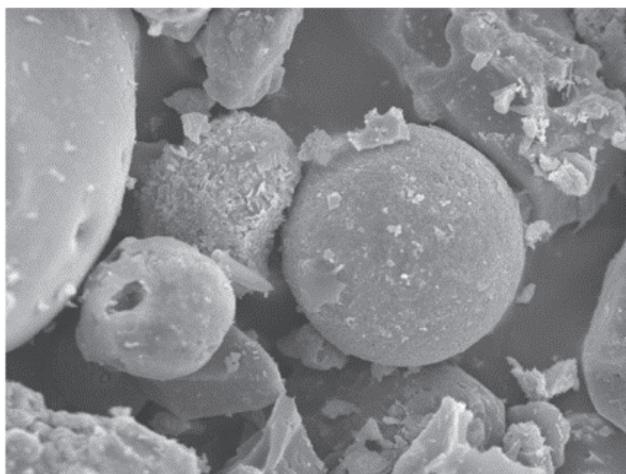
Neste contexto, o presente trabalho pretende avaliar a possibilidade da incorporação de quantidades significativas de dois resíduos provenientes de indústrias da Eurorregião Galiza-Norte de Portugal, que compreende a zona situada entre a costa cantábrica e o rio Douro, no Noroeste da Península Ibérica (ver Figura 1). Das indústrias mais importantes nesta eurorregião são a indústria da pedra natural e a indústria da silvicultura. Assim, um dos resíduos utilizados é uma cinza resultante da queima de biomassa florestal, empregue como combustível em centrais de biomassa. O outro resíduo, um pó-de-pedra, é resultante dos processos de extração do granito. Existem diversos estudos nos quais estes resíduos foram já empregues de forma isolada [2, 3], mas no presente estudo pretende-se investigar as sinergias resultantes do uso conjunto de ambos os tipos de resíduos no que respeita às propriedades, nos estados fresco e endurecido, de argamassas destinadas ao BAC.

2 Programa experimental

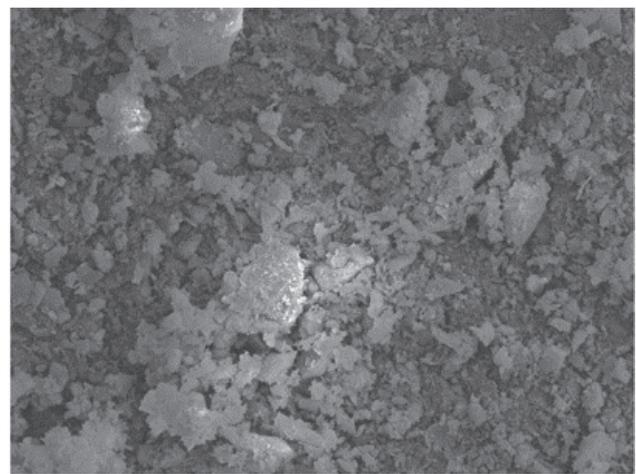
2.1 Materiais

As argamassas estudadas neste trabalho foram produzidas com os seguintes materiais: cimento CEM I 52,5 N-SR 5 (segundo a norma espanhola UNE-EN 197-1), metacaulino, pó-de-pedra, cinza de biomassa, areia normalizada, água e superplastificante. O

metacaulino foi fornecido pela Arciresa, uma empresa dedicada aos materiais refratários em Espanha. O pó-de-pedra foi fornecido pelo Centro Tecnológico do Granito de Galicia (CTG), tendo sido sujeito a um processo de secagem e desagregação antes de incorporado nas argamassas. A cinza de biomassa foi fornecida pela indústria madeireira galega, sendo proveniente de uma caldeira de biomassa e retirada dos filtros de ciclone de limpeza de gases, não tendo sido sujeita a nenhum tipo de tratamento antes do seu uso no fabrico das argamassas. Na Figura 2 é possível observar a forma das partículas da cinza da biomassa e do pó-de-pedra. Neste estudo usou-se uma areia normalizada, que é uma areia silicosa natural de grãos rolados (0,08-2 mm), com uma densidade de 2,63 e uma absorção de 0,30%, em massa. O superplastificante, baseado na tecnologia de polímeros policarboxilatos, tem massa específica de 1,05 g/cm³ e teor de sólidos de 20,3%. As propriedades químicas e físicas dos materiais finos estão apresentadas no Quadro 1 e as respetivas curvas de distribuição granulométrica encontram-se na Figura 3. A partir desta figura observa-se que o cimento e o metacaulino têm uma distribuição granulométrica semelhante, a cinza da biomassa é significativamente mais grossa que os restantes materiais e o pó-de-pedra apresenta maior finura que o cimento. Dada a diferença em termos da distribuição de tamanho de partículas de ambos os resíduos, decidiu-se combiná-los no presente estudo tendo em vista um aumento da densidade de empacotamento das partículas que constituem o conjunto de todos os materiais finos.



(a)



(b)

Figura 2 Imagens de microscópio eletrônico da cinza de biomassa (a) e do pó-de-pedra (b)

Quadro 1 Caracterização dos materiais finos

Análise química (%)	Cimento	Metacaulino	Pó-de-pedra	Cinza de biomassa
SiO ₂	18,9	58,0	70,4	40,0
Al ₂ O ₃	6,3	36,8	15,2	16,6
Fe ₂ O ₃	2,7	1,2	2,0	5,5
CaO	59,9	0,075	1,0	10,2
K ₂ O	1,9	2,1	5,5	6,9
Na ₂ O			3,7	1,6
MgO	1,6	0,18	0,35	2,8
P ₂ O ₅	0,13	0,079	0,38	2,9
TiO ₂	0,28	0,36	0,24	7,1
MnO	0,060		0,028	0,73
Rb ₂ O	0,007	0,014	0,035	0,026
CuO	0,014		0,007	0,022
ZnO	0,015	0,008	0,013	0,048
ZrO ₂	0,011	0,036	0,018	0,043
NiO			< 0,003	0,014
SrO	0,041		0,008	0,047
SO ₃	3,5	0,058		2,4
BaO				0,20
V ₂ O ₅	0,045			
Perda ao fogo	4,3	0,7	1,0	2,7
Superfície BET (m ² /g)	1,364	4,254	3,598	0,628
Massa volúmica (g/cm ³)	3,04	2,55	2,56	2,68

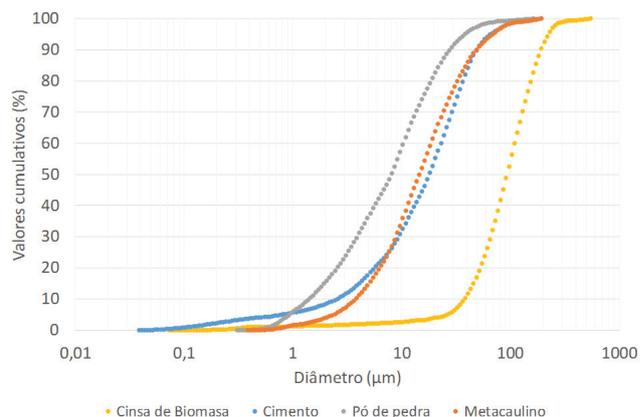


Figura 3 Curvas granulométricas dos materiais finos

2.2 Plano experimental

Neste trabalho consideraram-se 4 variáveis independentes: a razão volumétrica água/finos (V_w/V_p); a razão água/cimento, em massa (w/c); a razão superplastificante/total de finos, em massa (S_p/p); e a razão cinza/cimento, em massa (ash/c). As experiências foram planeadas segundo um plano fatorial completo 2^4 , correspondente a 4 fatores e 2 níveis por fator. Aos pontos correspondentes ao plano fatorial (Fi) foram adicionados pontos axiais (CC_i) e pontos centrais (C_c), resultando num plano Plano Fatorial Aumentado (*Central Composite Design*), que permite recolher dados suficientes para ajustar até um modelo polinomial de 2.^a ordem [4].

Deste modo, os efeitos das variáveis independentes foram avaliados em cinco níveis diferentes, codificados nos valores de $-\alpha$, -1 , 0 , $+1$, $+\alpha$. O valor de α é escolhido de modo a que o desvio padrão dos valores previstos para as variáveis de resposta seja constante para todos os pontos que se encontrem à mesma distância do ponto central do plano; $\alpha = n_i^{1/4}$, onde n_i é o número de observações na parte fatorial do plano, logo no presente estudo $\alpha = 2$ [4]. A correspondência entre os valores codificados nos níveis $-\alpha$, -1 , 0 , $+1$, $+\alpha$ e os valores reais das variáveis independentes é apresentada no Quadro 2. A experiência correspondente ao ponto central foi repetida 4 vezes para avaliar o erro experimental inerente à variabilidade dos materiais e das condições de ensaio. O volume de areia normalizada e a razão metacaulino/cimento mantiveram-se constantes em todas as misturas estudadas: $V_s/V_m = 0,475$ e $mtck/c = 0,20$, respetivamente. Tal como se pode observar na Figura 4, tomando como referência o volume total de finos: o volume de cimento variou entre 47 e 70%; o volume de metacaulino entre 11 e 17 %; o volume de pó-de-pedra entre 1 e 34% e o volume de cinzas de biomassa entre 6 e 13%.

Quadro 2 Plano experimental adotado

Referência	Variáveis em valores codificados				Valores reais das variáveis			
	A: V_w/V_p	B: w/c	C: S_p/p	D: ash/c	A: V_w/V_p	B: w/c	C: S_p/p	D: ash/c
C1 a	0	0	0	0	0,85	0,5	0,016	0,15
C4	0	0	0	0	0,85	0,5	0,016	0,15
F1	-1	-1	-1	-1	0,8	0,45	0,0155	0,125
F2	1	-1	-1	-1	0,9	0,45	0,0155	0,125
F3	-1	1	-1	-1	0,8	0,55	0,0155	0,125
F4	1	1	-1	-1	0,9	0,55	0,0155	0,125
F5	-1	-1	1	-1	0,8	0,45	0,0165	0,125
F6	1	-1	1	-1	0,9	0,45	0,0165	0,125
F7	-1	1	1	-1	0,8	0,55	0,0165	0,125
F8	1	1	1	-1	0,9	0,55	0,0165	0,125
F9	-1	-1	-1	1	0,8	0,45	0,0155	0,175
F10	1	-1	-1	1	0,9	0,45	0,0155	0,175
F11	-1	1	-1	1	0,8	0,55	0,0155	0,175
F12	1	1	-1	1	0,9	0,55	0,0155	0,175
F13	-1	-1	1	1	0,8	0,45	0,0165	0,175
F14	1	-1	1	1	0,9	0,45	0,0165	0,175
F15	-1	1	1	1	0,8	0,55	0,0165	0,175
F16	1	1	1	1	0,9	0,55	0,0165	0,175
CC1	-2	0	0	0	0,75	0,5	0,016	0,15
CC2	2	0	0	0	0,95	0,5	0,016	0,15
CC3	0	-2	0	0	0,85	0,4	0,016	0,15
CC4	0	2	0	0	0,85	0,6	0,016	0,15
CC5	0	0	-2	0	0,85	0,5	0,015	0,15
CC6	0	0	2	0	0,85	0,5	0,017	0,15
CC7	0	0	0	-2	0,85	0,5	0,016	0,1
CC8	0	0	0	2	0,85	0,5	0,016	0,2

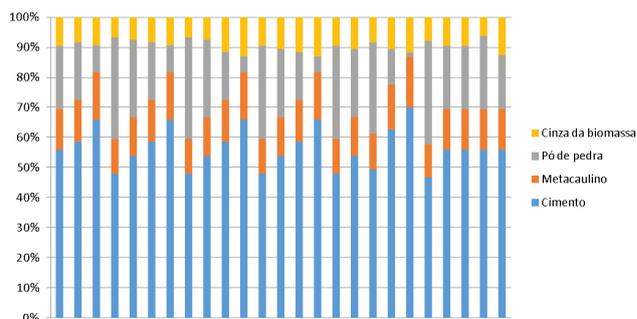


Figura 4 Percentagem com que cada material fino contribui para o volume total de finos

2.3 Procedimento de mistura e ensaios

O procedimento de amassadura seguido na preparação das argamassas foi o ilustrado na Figura 5. Para cada uma das composições previstas no plano experimental foram realizados os ensaios de fluidez (funil – V) e espalhamento da argamassa de acordo com os procedimentos descritos em [5]. Após estes ensaios foram moldados 5 prismas ($4 \times 4 \times 16 \text{ cm}^3$) e 3 cilindros ($h = 3 \text{ cm}$; $\phi = 5 \text{ cm}$) de cada mistura. Ao fim de 1 dia de idade, os provetes foram descofrados e colocados dentro de água numa câmara com temperatura controlada ($20 \text{ }^\circ\text{C}$), até à idade de ensaio. A campanha de ensaios realizada para cada mistura do plano experimental encontra-se descrita no Quadro 3, incluindo a identificação da norma/procedimento de ensaio utilizado. Com este conjunto de ensaios foram recolhidos dados para as seguintes variáveis de resposta: diâmetro de espalhamento (D_{flow}); tempo necessário para escoar a argamassa no funil V (T_{funnel}); resistência à compressão aos 28 dias ($f_{cm} - 28 \text{ dias}$); resistividade aos 28 e 56 dias (Resist – 28 d e Resist – 56 d) e porosidade acessível à água aos 28 dias (por – 28 d).

Quadro 3 Campanha de ensaios

Denominação do ensaio	Norma/ Recomendação	Idade à data de ensaio (dias)	Número de provetes/ medições	Tipo provetes/ Equipamento
Fluidez	[5]	Após fim da amassadura	2	Funil V
Espalhamento	[5]	Após fim da amassadura	2	Mini-cone
Resistividade elétrica	Método dos 2 elétrodos [6]	28 e 56 dias	4	Prismas $40 \times 40 \times 160 \text{ mm}^3$
Resistência à compressão	[7]	28 dias	4	Cubos 40 mm
Porosidade acessível à água	Procedimento descrito em [8]	28 dias	3	Cilindros $h = 3 \text{ cm}$; $\phi = 5 \text{ cm}$

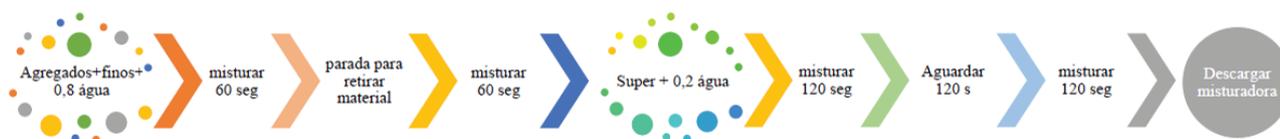


Figura 5 Procedimento de amassadura

3 Resultados e discussão

3.1 Análise dos resultados

Na Figura 6(a) apresentam-se os resultados dos ensaios no estado fresco, com exceção do resultado da mistura CC1, que bloqueou no ensaio do funil-V. Observa-se que as misturas apresentam tempos de escoamento no funil relativamente elevados, mesmo para diâmetros de espalhamento elevados, o que se ficará a dever à grande variedade de materiais finos utilizados, numa gama bastante alargada de dimensões. Na Figura 6(b) comparam-se os resultados das resistividades medidas aos 28 e 56 dias de idade. Deste gráfico pode concluir-se que dos 28 para os 56 dias de idade ainda há um aumento significativo da resistividade (11-23%), que traduz um refinamento progressivo da microestrutura com a idade, que se deverá à atividade pozolânica do metacaulino. Por outro lado, os resultados obtidos para a resistividade aos 28 dias de idade (82,8-219,3 Oh.m são relativamente elevados quando comparados, por exemplo, com os obtidos em argamassas com misturas binárias de cimento+pó-de-mármore (34,7-54,3 Ohm.m) [9]. Na Figura 6(c) apresentam-se os resultados da resistência à compressão e da porosidade acessível à água aos 28 dias de idade. Os resultados da resistência à compressão variaram entre 58 e 87 MPa, encontrando-se acima dos resultados obtidos por Destefani *et al.* [9] para a mesma razão w/c , tal como se mostra na Figura 6 (d).

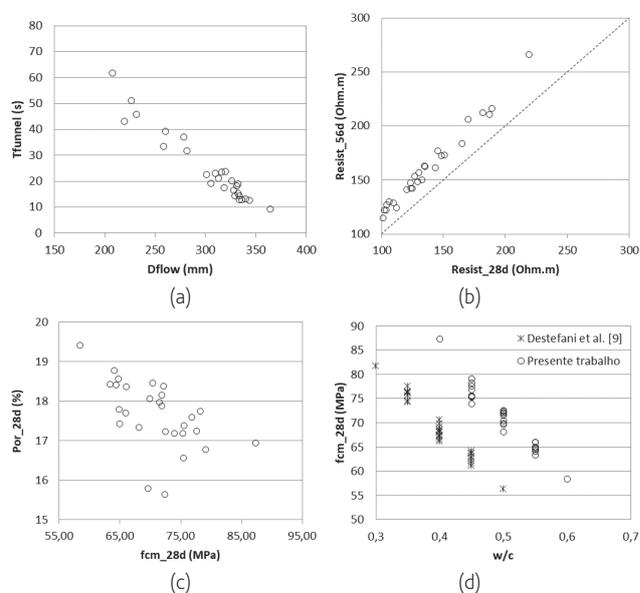


Figura 6 Resultados obtidos: (a) estado fresco; (b) resistividade aos 28 e 56 dias; (c) resistência à compressão e porosidade acessível à água, aos 28 dias; (d) resistência à compressão aos 28 dias em função da razão w/c

3.2 Ajuste de modelos numéricos

Após a recolha de dados procedeu-se ao ajuste de modelos numéricos (quadráticos) através de uma análise de regressão multilinear e análise de variância (ANOVA); seguida de uma validação dos modelos obtidos através da análise dos resíduos procurando tendências, evidências de autocorrelação ou *outliers*. Uma descrição mais detalhada destes procedimentos pode ser encontrada em [1]. Para todas as variáveis de resposta analisadas conseguiu-se um ajuste de boa qualidade. A partir dos modelos numéricos ajustados a cada variável de resposta é possível identificar os parâmetros da mistura que são significativos para explicar cada resposta, tal como ilustrado na Figura 7. Esta figura mostra claramente que V_w/V_p apresenta o maior efeito sobre ambas as respostas relacionadas com o comportamento no estado fresco (*Dflow* e *Tfunnel*); enquanto a razão w/c é a variável com maior influência nas propriedades do estado endurecido, nomeadamente, na resistência à compressão, resistividade e porosidade acessível à água. Tal como esperado, um aumento de V_w/V_p conduz a um aumento de *Dflow* e a uma redução de *Tfunnel*. Por sua vez, um aumento da razão w/c conduz a uma diminuição da resistividade e resistência à compressão e a um aumento da porosidade acessível à água.

De notar que no presente estudo a quantidade de metacaulino é dependente da quantidade de cimento, ou seja, quando a quantidade de cimento aumenta a quantidade de metacaulino também aumenta, dado que se manteve a razão $mtck/c$ fixa ($mtck/c = 20\%$). Logo, o efeito significativo da variável água/cimento traduz na verdade o efeito significativo da variável água/ligante, sendo o ligante constituído pelo cimento+metacaulino. Para além dos efeitos significativos de primeira ordem ilustrados na Figura 7, foram também identificados como significativos alguns efeitos de interação entre as variáveis e efeitos quadráticos.

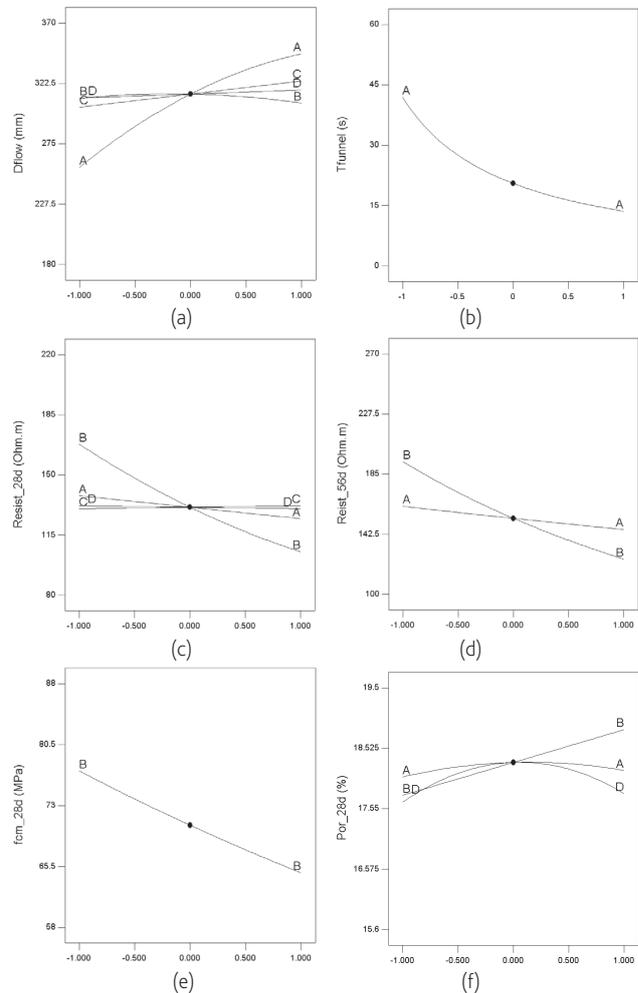


Figura 7 Identificação dos fatores que mais influenciam cada uma das variáveis de resposta, para variações a partir do ponto central (A: V_w/V_p ; B: w/c ; C: S_p/l_p ; D: ash/c , em valores codificados)

3.3 Otimização

A partir dos modelos de regressão, utilizando técnicas de otimização numérica, é possível determinar a gama de parâmetros da mistura onde a deformabilidade e a viscosidade coexistem de uma forma equilibrada, para assegurar a autocompactabilidade. A Figura 8 apresenta a região onde é possível encontrar argamassas que exibem $280 \leq D_{flow} \text{ (mm)} \leq 320$ e $14 T_{funnel} \text{ (s)} \leq 20$, sendo de notar que habitualmente não se consegue alcançar diâmetros de espalhamento tão elevados associados a tempos de escoamento relativamente elevados, ou seja, elevada deformabilidade associada a viscosidade moderada, com baixo risco de segregação. Tipicamente, os intervalos de valores adotados para argamassas destinadas ao BAC são: $250 \leq D_{flow} \text{ (mm)} \leq 270$ e $8 \leq T_{funnel} \text{ (s)} \leq 12$. Daqui pode concluir-se que a combinação de materiais finos utilizada no presente estudo permitiu alcançar um comportamento bastante melhorado no estado fresco.

Para além das condições ligadas ao comportamento no estado fresco é possível ainda acrescentar outras condições ao processo de otimização associadas com: a resistência mecânica (resistência à compressão pretendida); a durabilidade (maximizar a resistividade); o custo (diminuir a quantidade de cimento e superplastificante); e a sustentabilidade (reduzir o total de emissões de CO_2) e, desta forma, encontrar uma solução ótima única, ou seja, aquela que melhor satisfaz todas as condições de otimização, simultaneamente. Esta fase seguinte do processo de otimização será realizada após serem analisados os resultados da resistência à compressão e resistividade medidos após os 90 dias de idade, que à data da escrita do presente artigo ainda não tinham sido recolhidos.

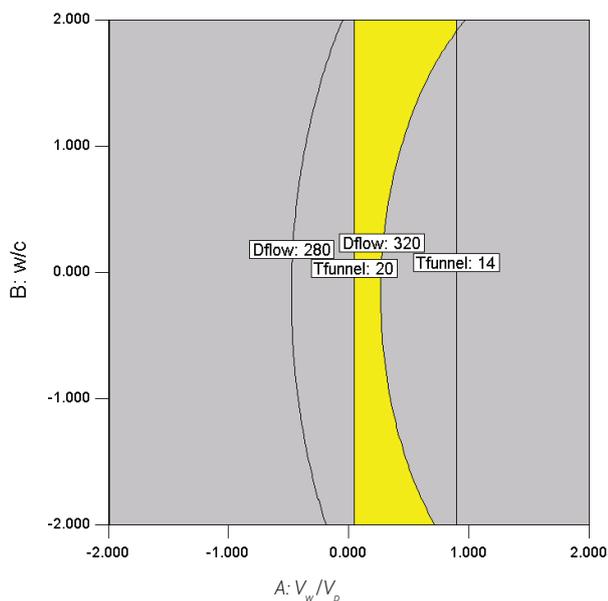


Figura 8 Região ótima para argamassas destinadas ao BAC (fixando $S_p/\rho = -1$ e $ash/c = +1$, em termos de valores codificados)

4 Conclusões

Com o presente trabalho demonstrou-se que o pó-de-pedra e a cinza da biomassa, ambos resíduos de duas indústrias da zona da Galiza, podem ser incorporados em conjunto para produzir BACs de elevada deformabilidade, sem risco de segregação, aumentando assim a gama de adições disponíveis para uso no BAC. Simultaneamente, ao substituir uma parte do cimento por metacaulino foi possível melhorar significativamente as propriedades do BAC no estado endurecido (maior resistência à compressão, maior resistividade e menor porosidade acessível à água), enquanto se reduzem as emissões de CO_2 pelo uso de menos cimento. A análise estatística dos dados recolhidos mostrou claramente que V_w/V_p apresenta o maior efeito sobre ambas as respostas relacionadas com o comportamento no estado fresco; enquanto a razão w/c (ou melhor, a razão água/ligante) é a variável com maior influência nas propriedades do estado endurecido, nomeadamente, na resistência à compressão, resistividade e porosidade acessível à água. A estratégia adotada neste estudo, em termos da seleção dos materiais finos, permite reduzir a quantidade de clínquer no produto final, por meio da maximização da proporção de adições minerais, sem prejudicar ou mesmo melhorando as propriedades do BAC no estado fresco e endurecido. Esta é uma oportunidade para o setor da construção obter, no curto prazo, ganhos ambientais e económicos.

Agradecimentos

Este trabalho foi financiado por: Unidade de Investigação UID/ECI/04708/2019 – CONSTRUCT - Instituto de I&D em Estruturas e Construções – financiada por fundos nacionais através da FCT/MCTES (PIDDAC). Este trabalho foi apoiado pelo programa IACOBUS - Programa de Cooperação Cultural, Científica e Pedagógica para Mobilidade Pré-doutoral, e pelos projetos BIA 2014-58063-R (HORREO) e BIA 2017-85657-R (HACCURACEM) del Programa Estatal de Investigación, Desarrollo e Innovación Orientada a los Retos de la Sociedad, MINECO.

Referências

- [1] Nunes, Sandra (2008) – *Performance-based design of self-compacting concrete (SCC): a contribution to enhance SCC mixtures robustness*. Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Tese de Doutoramento.
- [2] Sua-lam, G.; Makul, N. (2015) – "Utilization of coal- and biomass-fired ash in the production of self-consolidating concrete: a literature review". *Journal of Cleaner Production*, N. 100, pp. 59-76.
- [3] Medina, G. et al. (2017) – "Granite quarry waste as a future eco-efficient supplementary cementitious material (SCM): scientific and technical considerations", *Journal Cleaner Production* N. 148, pp. 467-476.
- [4] Montgomery, D.C. (2013) – *Design and Analysis of Experiments*. 8th ed. Wiley. New York. 684 p.

- [5] Okamura, H.; Ozawa, K.; Ouchi, M. (2000) – "Self-compacting concrete". *Structural Concrete*, Vol. 1, N. 1, pp. 3-17.
- [6] Nunes, S. [et al.] (2013) – "Mixture design of self-compacting glass mortar". *Cement and Concrete Composites*, Vol. 43, pp. 1-11,
- [7] NP EN 196-1 – *Methods of testing cement – Part 1: determination of strength* Lisbon, 2006
- [8] Moretti, J.P.; Nunes, S.; Sales, A. (2018) – "Self-compacting concrete incorporating sugarcane bagasse ash". *Construction and Building Materials*, N 172, pp. 635-649.
- [9] Destefani, A.Z.; Nunes, S.; Coutinho, J.S.(2016) – "Argamassa auto-compactável com pó de mármore". In: *Encontro Nacional Betão Estrutural*, Coimbra, Portugal.

