

HAC2018 | V Congresso Ibero-americano sobre Betão Auto-compactável e Betões Especiais

Valência, 5 e 6 de Março de 2018

Betão autocompactável produzido com resíduo agroindustrial

Juliana Moretti ⁽¹⁾, Sandra Nunes ⁽²⁾ e Almir Sales ⁽³⁾

⁽¹⁾⁽³⁾ Departamento de Engenharia Civil, Universidade Federal de São Carlos, Via Washington Luís, km 235, São Carlos, SP 13565-905, Brasil

⁽²⁾ Universidade do Porto, Faculdade de Engenharia, Departamento de Engenharia Civil, CONSTRUCT, Porto, Portugal

DOI: <http://dx.doi.org/10.4995/HAC2018.2018.5335>

RESUMO

A cinza que resulta da queima do bagaço da cana-de-açúcar (ACBC) é um resíduo agroindustrial gerado em larga escala no Brasil. Como alternativa de aplicação desse material, neste trabalho foi desenvolvido um betão auto-compactável (BAC) com a incorporação da ACBC. O programa experimental foi realizado segundo um plano fatorial em argamassas para otimizar a composição da pasta, que posteriormente foi verificada ao nível do betão. Foram adotados quatro parâmetros da mistura como variáveis independentes, nomeadamente, as relações água/cimento, água/finos, superplastificante/finos e ACBC/cimento. Após a definição das composições, diversas misturas de argamassa foram produzidas e realizaram-se os seguintes testes: espalhamento, fluidez, resistividade elétrica, resistência à compressão e porosidade acessível à água. Através de uma análise de regressão multilinear foram ajustados modelos numéricos aos dados experimentais. Por fim, foi possível otimizar uma mistura visando maximizar o teor de ACBC e atender aos requisitos de autocompactabilidade e durabilidade. Após essa etapa, foi produzido e caracterizado um BAC mantendo a composição da pasta. Por meio dos resultados obtidos pode-se concluir que a ACBC possui potencial para ser incorporada na fração dos finos na produção de BAC.

PALAVRAS-CHAVE: cinza do bagaço da cana-de-açúcar, resíduo agroindustrial, betão autocompactável, plano fatorial.

1.- INTRODUÇÃO

O Brasil é o maior produtor mundial no setor sucroalcooleiro e, dentre os principais resíduos gerados no processamento da cana-de-açúcar, destaca-se o bagaço. Esse resíduo é utilizado como biomassa para a geração de energia. Após a queima do bagaço, gera-se a cinza leve e cinza pesada. A cinza leve se acumula nos filtros das caldeiras e a cinza pesada, nomeada por Almeida et al. [1] como areia de cinza do bagaço da cana-de-açúcar (ACBC) é proveniente do fundo da caldeira. O manejo desses resíduos é um problema

enfrentado pelos administradores das usinas. Uma alternativa para a aplicação desse resíduo é a sua incorporação no betão autocompactável (BAC).

Akram et al. [2] avaliaram o custo e o potencial de aplicação da cinza do bagaço da cana-de-açúcar como modificador de viscosidade em comparação com um modificador de viscosidade comercial. Os autores concluíram que o custo do BAC produzido com cinza é 35% menor que o BAC produzido com um modificador de viscosidade comercial, mas, das vinte misturas testadas, apenas cinco satisfizeram os requisitos no estado fresco segundo as recomendações da EFNARC.

Sua-iam & Makul [3] utilizaram a cinza do bagaço da cana-de-açúcar em substituição parcial da areia (10%, 20%, 40% e 60% em volume) na produção de BAC. O incremento do uso da cinza levou a um aumento no teor de água necessário para manter a trabalhabilidade das misturas.

Noutro estudo, Sua-iam & Makul [4] substituíram a areia convencional pela ACBC, pelo pó de calcário e pela combinação de ACBC + pó de calcário em teores variando de 10% a 100% (em volume) para a produção de BAC. Os autores verificaram que as misturas produzidas com o uso conjunto de 20% de ACBC + 20% de pó de calcário satisfizeram os requisitos da EFNARC e apresentam melhores propriedades que o BAC de referência (sem resíduos).

O BAC deve atender aos requisitos de autocompactabilidade, resistência e durabilidade. Portanto, o proporcionamento adequado dos materiais é uma etapa muito importante para garantir esses requisitos. Todos os trabalhos mencionados acima [2]–[4] utilizaram um método baseado em tentativa-erro para dosear os betões, obtendo assim, poucas alternativas de composições. Uma maneira mais eficiente para o estudo do BAC é com o recurso a planos fatoriais [5]–[10]. Por meio deste método é possível variar diversos parâmetros da dosagem, simultaneamente, e verificar o efeito desses parâmetros e das suas interações no comportamento do material. Os resultados são analisados através de ferramentas estatísticas resultando em conclusões objetivas. Permite também desenvolver um modelo numérico empírico para expressar a relação entre os parâmetros de dosagem e a resposta do material [11]. Por meio dessa metodologia é possível explorar uma gama alargada de misturas com uma quantidade relativamente reduzida de experimentos.

O objetivo deste estudo consiste em explorar o potencial de utilização da ACBC como material fino em BAC através do desenvolvimento de um plano fatorial, ao nível de argamassa.

2.- PROCEDIMENTOS EXPERIMENTAIS

O presente trabalho foi desenvolvido em duas etapas. Primeiramente foi desenvolvido um planejamento fatorial em argamassas, com o intuito de otimizar a composição da pasta. A otimização visou maximizar o teor de ACBC e garantir as características de autocompactabilidade e durabilidade. Após a obtenção da pasta otimizada, foi produzido e caracterizado um betão autocompactável mantendo a composição da pasta.

2.1.- Materiais

Os principais materiais utilizados no desenvolvimento deste trabalho foram: areia de cinza do bagaço da cana-de-açúcar (ACBC), areia normalizada (CEN EN 191-1:2006), areia fina, areia média, brita, cimento Portland tipo I 42,5R (NP EN 197-1:2001), fíler calcário Betocarb® HP, superplastificante (Sp) Sika® ViscoCrete® 3005 e água.

A ACBC foi coletada das caldeiras de uma usina sucroalcooleira brasileira e moída em laboratório. Esse material é composto por 91% de SiO₂ e apresenta uma estrutura predominantemente cristalina [12]. A distribuição granulométrica dos materiais utilizados pode ser visualizada na Figura 1 e as características físicas estão apresentadas na Tabela 1.

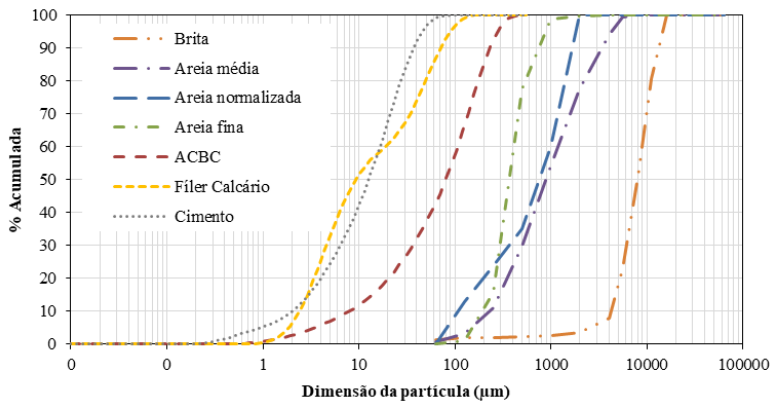


Figura 1- Distribuição granulométrica dos materiais.

Tabela 1 – Características físicas dos materiais.

	<i>Cimento</i>	<i>ACBC</i>	<i>Fíler Calcario</i>	<i>Areia Norm.</i>	<i>Areia fina</i>	<i>Areia Média</i>	<i>Brita</i>
Massa volúmica (kg/m ³)	3080	2690	2700	2630	2660	2660	2630
Absorção de água (%)	-	-	-	0,30	0,02	0,03	0,54

Segundo informações do fornecedor, o Viscocrete 3005 apresenta as seguintes características: massa específica de 1,05 g/cm³, teor de sólidos de 26% ± 1,3%, teor de cloretos <0,1%, e pH 4 ± 1.

2.2.- Planejamento das experiências ao nível da argamassa

Neste estudo foi utilizado um plano fatorial aumentado (“Central Composite Design”- CCD, na designação inglesa) constituído por $2^4 = 16$ pontos fatoriais (Fi), ao qual se acrescentaram 8 pontos axiais (CCi) e 6 pontos centrais (Ci), para avaliar o erro experimental. O efeito das variáveis independentes foi avaliado em cinco níveis: $-\alpha$, -1, 0, +1, + α , sendo $\alpha = 2$ [11]. Como variáveis independentes selecionaram-se: V_a/V_f (relação volume de água/volume de finos) variando de 0,75 a 1,05; a/c (relação água/cimento, em massa) variando de 0,35 a 0,55; Sp/f (relação superplastificante/total de finos, em massa) variando de 0,45% a 0,85% e $ACBC/c$ (relação ACBC/cimento, em massa) variando de 0% a 30%. A relação volume de areia/volume de argamassa (V_a/V_{arg}) foi mantida igual a 0,475 para todas as misturas. Na Tabela 2 apresentam-se todas as experiências previstas no plano experimental.

Tabela 2 – Plano fatorial aumentado (variáveis em valores codificados).

	Ci*	F1	F2	F3	F4	F5	F6	F7	F8	F9	F10	F11	F12	F13	F14	F15	F16	CC1	CC2	CC3	CC4	CC5	CC6	CC7	CC8
V_a/V_f	0	-1	1	-1	1	-1	1	-1	1	-1	1	-1	1	-1	1	-1	1	-2	2	0	0	0	0	0	0
a/c	0	-1	-1	1	1	-1	-1	1	1	-1	-1	1	1	-1	-1	1	1	0	0	-2	2	0	0	0	0
Sp/f	0	-1	-1	-1	-1	1	1	1	1	-1	-1	-1	-1	1	1	1	1	0	0	0	0	-2	2	0	0
$ACB/C/c$	0	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	0	0	0	0	0	-2	2

* foram realizadas 6 experiências com a mistura correspondente ao ponto central

2.3.- Ensaios realizados

As argamassas foram produzidas em uma argamassadeira mecânica em bateladas de 1,6 litros. Após a mistura foram realizados os testes de funil-V [13], espalhamento (flow) [13] e foram moldadas 5 amostras prismáticas (40 mm x 40 mm x 160 mm) e 3 cilíndricas (\varnothing 50 mm, h= 30 mm). As amostras foram desmoldadas 24 horas após a moldagem e mantidas em cura imersa até o dia do teste. No estado endurecido foram realizados os seguintes testes: resistividade elétrica, resistência à compressão (fcm) [14] e porosidade acessível a água, todos na idade de 28 dias.

O betão foi produzido em uma betoneira de eixo vertical em batelada de 50 litros. Após a mistura foram realizados os testes de segregação [15], anel J [16], espalhamento (flow) [17] e funil-V [18] e, finalmente, moldaram-se provetes para caracterização do betão no estado endurecido. Os provetes foram desmoldados 24 horas após a moldagem e mantidos em cura imersa até a data de teste. No estado endurecido foram realizados os seguintes testes: resistividade elétrica (sonda Wenner), resistência à compressão (fcm) [19], módulo de elasticidade [20], penetração de cloretos [21] e absorção de água por capilaridade [22].

3.- ANÁLISE DOS RESULTADOS E OTIMIZAÇÃO

3.1.- Resultados obtidos ao nível da argamassa

Os resultados obtidos nos ensaios realizados nas argamassas ao nível da argamassa estão apresentados na Tabela 3.

Tabela 3 – Resultados dos ensaios realizados nas argamassas.

<i>Ref.</i>	<i>Flow (mm)</i>	<i>V-funil (s)</i>	<i>Resis. (Ω.m)</i>	<i>Fcm (MPa)</i>	<i>Poros. (%)</i>	<i>Ref.</i>	<i>Flow (mm)</i>	<i>V-funil (s)</i>	<i>Resis. (Ω.m)</i>	<i>Fcm (MPa)</i>	<i>Poros. (%)</i>
C1	240	5,0	38,2	62,0	18,1	F10	203	4,8	42,1	64,0	18,1
C2	257	4,5	36,8	60,8	18,5	F11	230	5,6	36,8	56,9	17,9
C3	264	3,9	38,2	62,4	18,5	F12	248	3,6	33,4	54,3	19,2
C4	255	4,8	38,7	62,6	18,1	F13	214	8,2	45,2	67,6	16,9
C5	253	4,5	39,6	61,8	18,3	F14	266	3,8	40,7	67,4	17,9
C6	248	5,0	38,4	61,9	18,1	F15	318	4,5	36,7	59,7	16,9
F1	160	12,5	46,3	69,2	17,0	F16	327	2,6	34,2	57,3	16,6
F2	202	4,3	39,0	65,1	19,0	CC1	229	8,8	42,3	61,6	16,9
F3	250	5,4	35,1	56,7	17,8	CC2	270	2,8	35,4	61,4	18,9
F4	253	3,3	32,1	56,9	19,3	CC3	153	10,7	46,1	76,8	17,3
F5	241	7,3	45,5	69,8	16,7	CC4	326	3,1	32,3	54,0	17,3
F6	254	4,4	40,0	67,0	18,3	CC5	168	7,5	38,3	59,4	18,2
F7	316	4,5	37,0	59,9	16,4	CC6	319	4,4	39,9	64,2	17,5
F8	319	3,0	33,4	58,6	17,7	CC7	248	4,7	37,7	62,9	18,6
F9	165	10,0	44,4	68,7	17,6	CC8	248	5,0	38,2	60,7	18,2

Os resultados de cada variável de resposta foram analisados por um software comercial [23]. Foram utilizadas análises de regressão e de variância (ANOVA) para selecionar os termos mais significativos, partindo de um modelo quadrático completo.

3.3.- Modelos ajustados

Os modelos ajustados para cada variável de resposta estão descritos na Tabela 3. A variável com uma influência mais significativa em todas as propriedades analisadas foi a a/c. No caso do tempo de escoamento no funil, Sp/f apresentou também uma influência muito significativa. A variável ACBC/c apresentou uma influência significativa apenas na resistência à compressão e porosidade. O aumento no teor de substituição do cimento pela ACBC leva a redução da resistência e aumento da porosidade. Esse resultado pode ser justificado pela baixa atividade pozolânica desse material [24]. Todos os modelos apresentam muito boa correlação ($R^2/R^2_{ajus} > 0,94$), sendo que apenas para a previsão da porosidade se obteve um R^2 um pouco mais baixo de 0,85.

Tabela 4 – Modelos ajustados (valores reais das variáveis independentes).

Variável de resposta	Modelo	Desvio Padrão	R ² / R ² _{ajus}
Flow (mm)	$-1202,04 + 981,32Va/Vf + 2427,71 a/c + 351,77Sp/f - 1862,50Va/Vf \times w/c$	8,370	0,97/0,97
[V-funil (s)] ^{-0,5}	$-1,406 + 0,902 Va/Vf + 1,132a/c + 1,436Sp/f - 0,912(Sp/f)^2$	0,022	0,95/0,94
[Res. (Ω.m)] ^{-0,5}	$0,0428 + 0,0521 Va/Vf + 0,159 a/c$	0,002	0,95/0,95
Fcm (MPa)	$82,289 - 10,161 Va/Vf - 417,817a/c + 10,446Sp/f - 6,583 ACBC/c + 349,42 (a/c)^2$	0,620	0,97/0,96
Porosidade (%)	$-28,622 + 13,989 Va/Vf + 127,391 a/c + 21,258 Sp/f + 40,189 ACBC/c - 100,500(a/c)^2 - 46,00 Va/Vf \times ACBC/c - 56,50 a/c \times Sp/f$	0,190	0,85/0,81

3.3.- Argamassa otimizada

Os critérios adotados para otimizar a argamassa foram os seguintes: relação água/cimento igual 0,45, maximizar o teor de ACBC, garantir as propriedades de autocompactabilidade (mantendo o espalhamento de 250 a 260 mm e o tempo de funil de 6 a 8 s), maximizar a resistividade e minimizar a porosidade. Os parâmetros da mistura otimizada obtidos pelo modelo foram: Va/Vf = 0,761; Sp/f = 0,0074 e ACBC/c = 0,225. Os resultados previstos e resultados obtidos estão apresentados na Tabela 5. Da análise desta tabela pode observar-se que a relação entre resultados previstos/medidos se encontra muito próximo de 1,0.

Tabela 5 – Resultados previstos e medidos para a argamassa otimizada

	Flow (mm)	V-funil (s)	Resistividade (Ohm.m)	fcm (MPa)	Porosidade (%)
Resultado previsto	260.00	8.00	42.13	63.55	17.08
95% IP mínimo*	239.48	6.27	39.92	61.17	16.20
95%IP máximo*	280.52	10.56	44.53	65.92	17.95
Resultado medido	261.00	8.31	47.25	62.78	16.17
Res. previsto / Res. medido	1.00	0.96	0.89	1.01	1.06

(*) Intervalo de previsão com nível de confiança de 95%.

3.3.- Caracterização do betão

Após a otimização da pasta, foi produzido um BAC com essa composição da pasta. Os parâmetros de mistura utilizados foram: a/c=0,45; Va/Vf=0,761; Sp/f=0,0074; ACBC/c=0,225; Vs/Vm=0,423; Af/Am (areia fina/areia média)=0,20; Vg/Vglim (volume de brita/relação entre a massa unitária compactada e massa específica da brita)=0,525 e Va (teor de ar incorporado)= 0,02. Vale salientar que o teor de Sp utilizado na argamassa otimizada foi ligeiramente aumentado (+10%) para produzir o betão, atendendo à influência dos agregados. O consumo de materiais por metro cúbico do BAC produzido está apresentado na Tabela 6.

Tabela 6- Consumo de materiais (Kg/m³).

<i>Água</i>	<i>Cimento</i>	<i>Filer</i>	<i>ACBC</i>	<i>Sp</i>	<i>Areia fina</i>	<i>Areia média</i>	<i>Brita</i>
166,53	367,25	181,27	82,63	5,14	148,89	595,56	835,75

Os resultados dos testes realizados no estado fresco estão apresentados na Tabela 7. Segundo a norma NP EN 206-9 [25] o betão se enquadra na classe de espalhamento SF2, classe de viscosidade t_{500} VS1, classe de espalhamento no anel J SF_j2, classe de viscosidade no anel J t_{500} VJ2, classe VF1 para o teste de funil e classe SR2 quanto a resistência à segregação.

Tabela 7- Resultados do BAC no estado fresco.

<i>Testes</i>	<i>Resultados</i>
Espalhamento (mm)	730
T500 (s)	1,9
V – funil (s)	8,3
Espalhamento com o anel J (mm)	710
T500 com o anel J (s)	2,3
Índice de segregação (%)	9

Na Tabela 8 estão apresentados os resultados obtidos nos ensaios no estado endurecido.

Tabela 8 – Resultados do BAC no estado endurecido.

<i>Testes</i>	<i>Média</i>	<i>DP¹</i>	<i>CV² (%)</i>
Resistividade 28 dias (KΩ.cm)	11,6	1,1	9,7
Módulo de elasticidade (GPa)	45,4	0,5	1,1
Resistência à compressão aos 28 dias (MPa)	51,9	1,0	1,9
Coefficiente de difusividade de cloretos ($\times 10^{-12} \text{m}^2 \text{s}^{-1}$)	11,57	1,1	9,7
Coefficiente de Sortividade [$\text{mg}/\text{mm}^2 \times \text{min}^{0,5}$]	0,0489	0,0031	6,3

¹ Desvio Padrão; ² Coeficiente de variação

De acordo com a NP EN 1992 [26], o BAC se enquadra na classe de resistência de C40 No quesito de durabilidade, o betão apresentou moderada resistência à penetração de cloretos, de acordo com a classificação proposta por Nilsson et al. (1998, apud [27]) e baixa probabilidade de corrosão em função da resistividade elétrica (valor entre 10 e 20 kΩ.cm), de acordo com a especificação do CEB 192 [28]. Quanto a absorção de água por capilaridade, o betão apresentou alta qualidade segundo Browne (1991, apud [27]) devido ao baixo coeficiente de sortividade ($<0,1 \text{ mg}/\text{mm}^2 \times \text{min}^{0,5}$).

4.- CONCLUSÕES

- A ACBC não influenciou significativamente as propriedades no estado fresco das argamassas.
- O aumento no teor de substituição do cimento pela ACBC leva a uma redução da resistência e aumento da porosidade das argamassas.
- Os modelos obtidos para as argamassas são aplicáveis na região experimental: $0,75 \leq V_a/V_f \leq 1,05$; $0,35 \leq a/c \leq 0,55$; $0,45\% \leq Sp/f \leq 0,85\%$; e $0\% \leq ACBC/c \leq 30\%$, mantendo uma distância ao centro do plano inferior a 2,5 (em valores codificados).
- O betão produzido com ACBC apresentou propriedades adequadas para ser aplicado como autocompactável.
- Os resultados indicam que a ACBC possui potencial para ser incorporado na fração dos finos na composição de betões autocompactáveis.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem o programa EBW+ pela bolsa concedida, o CONSTRUCT/LABEST / FEUP, a engenheira Paula Silva e o técnico Cláudio Ferraz pelo suporte nos testes laboratoriais, o PPGECIV / UFSCar, o Instituto de Pesquisas Tecnológicas de São Paulo – IPT e a empresa Raízen pela doação da ACBC.

Este trabalho foi financiado por: Projeto POCI-01-0145-FEDER-007457- CONSTRUCT – Instituto de I&D em Estruturas e Construções – financiado pelo Fundo europeu de Desenvolvimento Regional (FEDER), através do COMPETE2020 – Programa Operacional Competitividade e Internacionalização (POCI) e por fundos nacionais através da Fundação para a Ciência e a Tecnologia I.P.

REFERÊNCIAS

- [1] F. C. R. Almeida, A. Sales, J. P. Moretti, and P. C. D. Mendes, “Sugarcane bagasse ash sand (SBAS): Brazilian agroindustrial by-product for use in mortar,” *Constr. Build. Mater.*, vol. 82, pp. 31–38, 2015.
- [2] T. Akram, S. A. Memon, and H. Obaid, “Production of low cost self compacting concrete using bagasse ash,” *Constr. Build. Mater.*, vol. 23, no. 2, pp. 703–712, 2009.
- [3] G. Sua-Iam and N. Makul, “Use of increasing amounts of bagasse ash waste to produce self-compacting concrete by adding limestone powder waste,” *J. Clean. Prod.*, vol. 57, pp. 308–319, 2013.
- [4] G. Sua-Iam and N. Makul, “Utilization of coal- and biomass-fired ash in the production of self-consolidating concrete: A literature review,” *J. Clean. Prod.*, vol. 100, pp. 59–76, 2015.

- [5] S. Nunes, H. Figueiras, P. Milheiro Oliveira, J. S. Coutinho, and J. Figueiras, “A methodology to assess robustness of SCC mixtures,” *Cem. Concr. Res.*, vol. 36, no. 12, pp. 2115–2122, 2006.
- [6] S. Nunes, P. M. Oliveira, J. S. Coutinho, and J. Figueiras, “Interaction diagrams to assess SCC mortars for different cement types,” *Constr. Build. Mater.*, vol. 23, no. 3, pp. 1401–1412, 2009.
- [7] S. Nunes, A. M. Matos, T. Duarte, H. Figueiras, and J. Sousa-Coutinho, “Mixture design of self-compacting glass mortar,” *Cem. Concr. Compos.*, vol. 43, pp. 1–11, 2013.
- [8] H. Figueiras, S. Nunes, J. S. Coutinho, and C. Andrade, “Linking fresh and durability properties of paste to SCC mortar,” *Cem. Concr. Compos.*, vol. 45, pp. 209–226, 2014.
- [9] W.-J. Long, G. Lemieux, S.-D. Hwang, and K. H. Khayat, “Statistical models to predict fresh and hardened properties of self-consolidating concrete,” *Mater. Struct.*, vol. 45, no. 7, pp. 1035–1052, 2012.
- [10] W.-J. Long, K. Khayat, G. Lemieux, F. Xing, and W.-L. Wang, “Factorial Design Approach in Proportioning Prestressed Self-Compacting Concrete,” *Materials (Basel)*, vol. 8, no. 3, pp. 1089–1107, 2015.
- [11] D. C. Montgomery, *Design and Analysis of Experiments Eighth Edition*. 2013.
- [12] J. P. Moretti, A. Sales, F. C. R. Almeida, M. A. M. Rezende, and P. P. Gromboni, “Joint use of construction waste (CW) and sugarcane bagasse ash sand (SBAS) in concrete,” *Constr. Build. Mater.*, vol. 113, pp. 317–323, 2016.
- [13] H. Okamura and M. Ouchi, “Self-Compacting Concrete,” *J. Adv. Concr. Technol.*, vol. 1, no. 1, pp. 5–15, 2003.
- [14] NP EN 196-1, “Methods of testing cement – Part 1: determination of strength,” Lisbon, 2006.
- [15] Portugal. IPQ., “Ensaio do betão fresco NP EN 12350:2010 Parte 11: Betão autocompactável. Ensaio de segregação no peneiro.” 2010.
- [16] Portugal. IPQ., “Ensaio do betão fresco NP EN 12350 Parte 12: Betão autocompactável. Ensaio de espalhamento no anel J.” 2010.
- [17] Portugal. IPQ., “Ensaio do betão fresco Parte 8: Betão autocompactável. Ensaio de espalhamento.” 2010.
- [18] Portugal. IPQ., “Ensaio do betão fresco NP EN 12350:2010 Parte 9: Betão autocompactável. Ensaio de esvacoamento no funil V.” 2010.
- [19] NP EN 12390, “Ensaio do betão endurecido. Parte 3: Resistência à compressão dos provetes,” Lisboa, 2009.

Betão auto-compactável produzido com resíduo agroindustrial

HAC2018 | V Congreso Iberoamericano de Hormigón Autocompactante y Hormigones Especiales

- [20] DIN 1048, “EN-Testing Concrete Part 5: Determination of Depth of Penetration of Water under Pressure in Hardened Concrete.” Berlin, Germany, 1991.
- [21] LNEC E463, “Betões. Determinação do coeficiente de difusão de cloretos por ensaio de migração em regime não estacionário.” 2004.
- [22] T. C. RILEM, “116-PCD Permeability of concrete as a criterion of its durability,” vol. 32.4. *Mater Struct*, pp. 174–179, 1999.
- [23] Design-expert software, “Design-expert software.” Guide: State-Ease, p. 2007, 2007.
- [24] M. Frías, E. Villar, and H. Savastano, “Brazilian sugar cane bagasse ashes from the cogeneration industry as active pozzolans for cement manufacture,” *Cem. Concr. Compos.*, vol. 33, pp. 490–496, 2011.
- [25] NP EN 206-9, “Betão Parte 9: Regras adicionais para betão autocompactável (BAC),” 2010.
- [26] NP EN 1992-1-1, “Eurocódigo2: Projecto de estruturas de betão. Parte1-1: Regras gerais e Regras para edifícios.” 2008.
- [27] M. D. L. Garcia and J. Sousa-Coutinho, “Strength and durability of cement with forest waste bottom ash,” *Constr. Build. Mater.*, vol. 41, pp. 897–910, 2013.
- [28] COMITÉ EURO-INTERNACIONAL DU BÉTON, “Diagnosis and assessment of concrete structures – State of the Art Report. Bulletin d ’ Information n°192.”