



Avaliação do potencial do uso de cinzas volantes de biomassa na produção de betões

Elisabete Teixeira

*University of Minho, ISISE, Department of Civil Engineering, Guimarães, Portugal,
elisabeterodrigues@gmail.com*

Aires Camões

*CTAC, Department of Civil Engineering, School of Engineering, University of Minho
Campus de Azurém, Portugal*

Fernando G. Branco

University of Coimbra, ISISE, Department of Civil Engineering, Coimbra, Portugal

Resumo

Hoje em dia, diversos subprodutos ou resíduos têm sido estudados para a sua incorporação nos materiais de construção e um desses subprodutos são as cinzas volantes de carvão (CV). No entanto, o uso de grandes volumes desses materiais apresenta algumas dificuldades para as características dos betões, sendo uma delas, a sua suscetibilidade aos problemas associados com a carbonatação. Assim, é necessário encontrar novos materiais ou soluções para estes problemas. Cinzas volantes de biomassa (CB) são um resíduo com origem na queima de biomassa florestal para a produção de calor e energia, em países como Portugal, este subproduto é depositado em aterros. Uma vez que, este resíduo apresenta características pozolânicas, muitos estudos têm tentado perceber se é possível a sua aplicabilidade como material substituto do cimento na produção de betão. Neste estudo, o efeito do uso de CB na qualidade, durabilidade e sustentabilidade de betões foi avaliado. Uso de grandes quantidades de CB não conduz à produção de betões com melhor desempenho do que betões convencionais (só com cimento como ligante). Contudo, o uso de pequenas quantidades de CB misturadas com cinzas volantes de carvão, permite obter resistências à compressão similares às das composições produzidas só com cimento, mas melhorando a resistência à carbonatação e à penetração de cloretos e majorando o desempenho ambiental. Os resultados mostraram que, uma das soluções para a minimização de problemas relacionados com betões com elevados teores de cinzas volantes, pode ser a utilização de pequenas quantidades de CB misturadas com CV. Uma vez que, o uso de pequenas quantidades de CB misturado com CV conduz a betões com qualidade similar, mas com uma maior durabilidade e sustentabilidade do que betões só com cimento como ligante e que minimiza o efeito da dosagem de grandes quantidades de CV.

Palavras-chave: Betão; Cinzas Volantes de Biomassa; Cinzas volantes de Carvão; Durabilidade; Sustentabilidade

1 INTRODUÇÃO

Hoje em dia, verifica-se um crescimento contínuo da população, conduzindo a grandes aglomerados populacionais, essencialmente em zonas urbanas. É sabido, que as cidades usam 3% da superfície terrestre, mas que o consumo de recursos a nível global é aproximadamente de 75%, sendo estas cidades responsáveis por mais de 75 a 80% das emissões de gases com efeito de estufa [1,2]. Isto conduz à produção de elevadas quantidades de resíduos, que conduzem a problemas ambientais, tais como, contaminação de solos e águas, diminuição da biodiversidade, perdas de ecossistemas. A nível mundial, diversos países e setores económicos seguem o princípio da Economia Linear, baseado em princípios de extração-transformação-use-disposição final. Este modelo económico apresenta um elevado consumo de matérias primas e produção de grandes quantidades de resíduos e elevadas emissões para atmosfera, provocando elevados custos de gestão e impacte no ambiente [3].

A União Europeia estabeleceu uma estratégia a longo-prazo, até 2050, em que definiu o objetivo de se atingir uma economia zero em termos de emissões de gases com efeito de estufa. Este objetivo faz parte da estratégia “*European Green Deal*”, assinado no acordo de Paris [4]. Para além disso, existe cada vez mais uma preocupação com a sustentabilidade, e todos os setores económicos têm procurado adotar princípios de Economia Circular, em alternativa ao modelo linear, encorajando o ideal de usar os recursos no seu potencial máximo de valor, incluindo neste valor a sua recuperação ou regeneração após o uso, conduzindo à redução de resíduos produzidos, consumo de matérias-primas e a uma economia mais competitiva.

A indústria da construção é um importante setor económico na União Europeia, contudo a indústria do cimento é uma das fontes mais significativas em termos de poluição ambiental. É sabido, que as empresas de produção de cimento libertam grandes quantidades de CO₂ para a atmosfera, causando elevados prejuízos para o ambiente e que conduzem ao aumento da produção de gases com efeito de estufa [5–7]. A população mundial tem vindo a aumentar drasticamente, resultando num crescimento da demanda da construção, tem levado a uma maior extração de recursos naturais a serem usados na produção de betão. Devido a estes efeitos negativos, nos últimos anos, os investigadores têm tentado produzir/dimensionar betões que tenham um menor impacte ambiental, mas mantendo ou melhorando as suas propriedades, qualidade e durabilidade. Uma das formas que se têm vindo a estudar é substituição do cimento por materiais que possuam as mesmas propriedades, mas que sejam mais sustentáveis, como por exemplo, as cinzas volantes de carvão, as cinzas volantes de biomassa, cinzas de bagaço, entre outros [8].

As cinzas volantes de biomassa (CB) têm vindo a ser utilizadas com material substituto do cimento, devendo-se ao facto de apresentarem propriedades físicas e químicas semelhantes às cinzas volantes de carvão (CV) [9]. O uso das CB como material substituto parcial do cimento mostrou diversos efeitos positivos nas misturas de cimento e alguns desses resultados estão descritos em [9], contudo existem algumas cinzas de biomassa que não apresentam características pozolânicas. Os materiais cimentícios apresentarem boas propriedades quando são usadas cinzas de biomassa, como material substituto do cimento, no entanto, não existe ainda regulamentação para aplicação destas nos betões. Assim, as normas utilizadas para a regulamentação da aplicação cinzas volantes em betão, têm sido usadas como base para a incorporação das CB. Na Fig. 1 é apresentada uma comparação entre o conteúdo de cálcio presente nas cinzas e a soma dos óxidos (SiO₂+Al₂O₃+Fe₂O₃) para diversas cinzas de biomassa, sendo feita uma comparação com cinzas volantes de carvão e com as

regulamentações em vigor. Esta análise foi feita através de uma recolha de diversas composições físicas e químicas de diferentes CB presentes na literatura, esta análise encontra-se mais detalhada em [9]. Como se pode observar, a maioria das CB e das misturas de CB com CV, são consideradas pela norma ASTM C618-15:2015, como classe C. No entanto, é de realçar que a classificação das CB através das normas europeias e americanas é um processo muito complexo, uma vez que, existe uma diversidade de cinzas que em termos de óxidos ou conteúdo em cálcio não permite a sua classificação pelas normas utilizadas para a classificação de cinzas usadas para a produção de betão.

Contudo, apesar da dificuldade na sua classificação com base nas normas atuais, estas cinzas apresentam um teor alcalino superior as cinzas volantes, sendo que a sua utilização pode ser benéfica em alguns tipos de betões, tais como os betões com elevados teores de adições, onde o conteúdo alcalino é menor, devido às reações pozolânicas, que leva a problemas relacionados com a diminuição do pH e dos compostos alcalinos e, conseqüentemente, à corrosão das armaduras de estruturas de betão armado. Para além disso, a utilização de CB na produção de betões, conduz a uma solução mais sustentável tanto para a indústria do betão, como para a gestão final deste material.

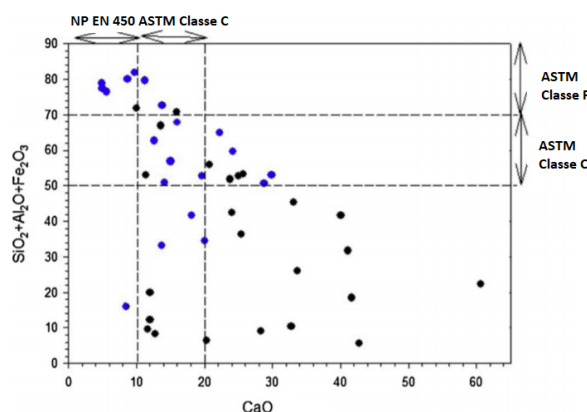


Figura 1. Relação entre o conteúdo em óxido de cálcio presente nas cinzas e a soma dos óxidos, para diferentes cinzas de biomassa (em preto) e comparação com as cinzas volantes de carvão (em azul) [9]

O objetivo do presente estudo é avaliar o efeito das cinzas volantes de biomassa na qualidade, durabilidade e sustentabilidade de betões com elevados teores de adições.

2 Materiais e Métodos

Após uma análise detalhada das potenciais utilizações de CB como material substituto do cimento e o seu efeito nas propriedades de betões, a qual foi apresentada em [9], identificou-se a existência de uma deficiência no potencial do uso destas cinzas em betões com elevados volume de cinzas volantes. Assim, um grupo de composições de argamassas foi produzido onde se avaliou o uso de CB como material de substituto de cimento, a sinergia das duas cinzas volantes e o uso de CB como material alcalino, os resultados deste estudo encontram-se apresentados em [10–12]. Conforme observado na Fig. 2, as cinzas de biomassa apresentam uma melhor performance quando usadas como material reservatório de alcalinidade, pois conduzem a um aumento da durabilidade e qualidade e sustentabilidade das argamassas com elevado volume de cinzas volantes de carvão.

Baseado nestes resultados, foi escolhido um conjunto de formulações e estudado betões com baixo conteúdo de CB (0.5, 1.5 e 5%*m* de substituição do cimento), estas composições foram comparadas um betão com elevado conteúdo de cinzas volantes de carvão (50%*m* de CV).

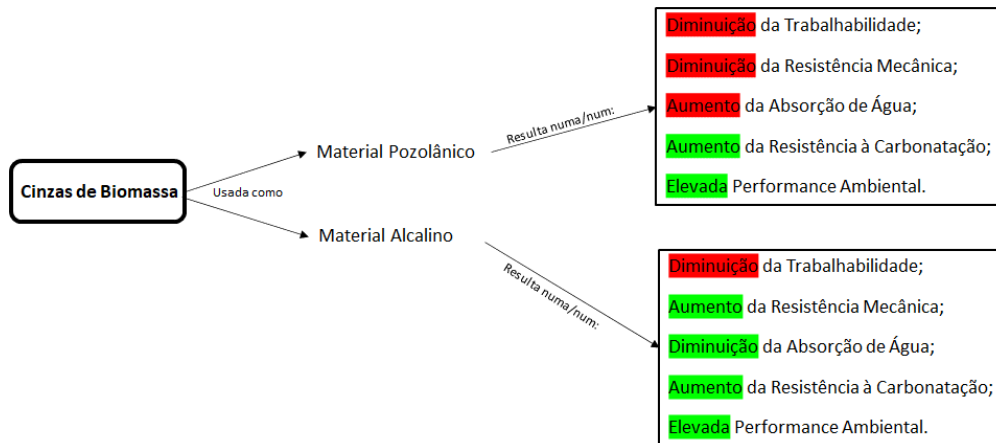


Figura 2 – Principais efeitos do uso de cinzas de biomassa, como material substituo do cimento e como material alcalino, nas propriedades de argamassas com elevados teores de cinzas volantes de carvão

2.1 Caraterização dos materiais utilizados

Na preparação das composições de betão foi utilizado cimento CEM I 42.5R (Outão, Secil), cinzas de biomassa provenientes de uma central de combustão que usa resíduos florestais para a produção de energia e calor para o setor da pasta do papel, cinzas volantes de carvão provenientes de uma central termoelétrica e três tipos de agregados: meia areia-rolada 0-4 mm, brita granítica 4-8 mm e brita granítica 6-12mm. A caracterização física e química dos diferentes materiais encontra-se apresentada em [10–12].

2.2 Formulação das composições de betão e sua caraterização

Um grupo de composições de betão foi preparada com a utilização de 0,5, 1,25 e 5 %*m* de cinzas volantes de biomassa (percentagem referente ao conteúdo total de ligante). A totalidade de ligante utilizada foi de 350 kg/m³, sendo produzidos betões com 50 %*m* de substituição de cimento, com uma razão de água/ligante de 0,35 e com recurso ao uso de superplastificante, para uma melhor trabalhabilidade do betão fresco. Foram analisadas propriedades referentes à qualidade (resistência à compressão) e durabilidade (resistência à carbonatação e penetração de cloretos), para betões com 28, 90 e 180 dias de cura, e sustentabilidade (análise do ciclo de vida) (Fig. 3).

Betão com elevado teor de cinzas				
Nomenclatura	Cimento	CV	CB	SP
		kg/m ³		%
REF	175	175	-	0,5
CB0.5	175	174	2	0,7
CB1.3	175	171	4	0,7
CB5	175	160	18	0,2

<ul style="list-style-type: none"> • Resistência à compressão; • Carbonatação acelerada; • Penetração de cloretos • ACV 	28, 90, 180 dias de cura
---	--------------------------

Figura 3 – Composições dos betões estudados e ensaios realizados

2.2.1 Resistência à compressão

O teste de compressão foi realizado de acordo com a norma NP EN 12390-3:2003 [13], foram realizados testes em três amostras para cada composição de betão, em provetes de 100x100x100 mm³. As amostras foram imersas em água, até ao dia do teste. Após a cura, as amostras foram testadas numa prensa (Elle que possui uma gama de força entre 50-3000 kN) até à rutura de cada amostra aos 28, 90 e 180 dias de cura. A força máxima foi registada e a resistência à compressão foi calculado de acordo com a Eq. (1).

$$f_c = \frac{F}{A_c} \quad (1)$$

Onde, f_c é a resistência à compressão em (MPa), F é a força máxima aplicada (N) e A_c é a area da seção setorial onde a força é aplicada (mm²).



Figura 4 – Teste de compressão

2.2.2 Resistência à carbonatação

A resistência à carbonatação foi avaliada através de um ensaio acelerado com o objetivo de medir a resistência à penetração de CO₂ do betão. Este ensaio foi realizado de acordo com o procedimento do LNEC E 391:1993 [14]. Após a preparação, as amostras foram colocadas numa câmara húmida relativa, temperatura e concentração de CO₂ controlada. Em cada composição foram cortadas amostras com 1 cm de espessura, com uma periodicidade de 30 dias, sendo pulverizada com uma solução de fenolftaleína. Na superfície pulverizada mediui-se a profundidade de carbonatação [14].

2.2.3 Determinação do coeficiente de difusão de cloretos por ensaio de migração em regime não estacionário

Neste ensaio, o coeficiente de difusão dos cloretos determinado é uma medida de resistência à penetração dos cloretos do betão e foi realizado segundo a especificação do LNEC E 463:2004 [15]. Para cada composição foram preparadas amostras em moldes cilíndricos de 100 mm de diâmetro e 50 mm de espessura, após cada período de cura, os provetes foram cortados em fatias com 200 mm de comprimento, sendo obtido 3 amostras para cada cilindro. Um potencial elétrico externo foi aplicado axialmente através da amostra para forçar os iões de cloreto migrarem para fora da amostra. Após o período de teste, a amostra foi dividida axialmente e uma solução de nitrato de prata foi pulverizada nas seções recém-divididas. A profundidade de penetração do cloreto foi medida a partir da precipitação de cloreto de prata (branco visível), permitindo a determinação do coeficiente (Eq. 2). Uma descrição detalhada do método utilizada encontra-se descrita em [15,16].

$$D = \frac{RT}{zFE} \cdot \frac{x_d - \alpha\sqrt{x_d}}{t} \quad (2)$$

Onde,

$$E = \frac{U - 2}{L} \quad (3)$$

$$\alpha = \sqrt{\frac{RT}{zFE} \cdot \operatorname{erf}^{-1}\left(1 - \frac{2C_d}{C_0}\right)} \quad (4)$$

e D é o coeficiente de difusão em regime não estacionário; z é o valor absoluto da valência do ião, para os cloretos z=1; F a constante de Faraday: $F=9,648 \times 10^4$ J/(V.mol); U o valor absoluto da voltagem aplicada (em Volts), R a constante dos gases perfeitos: $R=8,314$ J/(K.mol); T o valor médio das temperaturas inicial e final na solução anódica (graus Kelvin); L a espessura do provete (m); x_d o valor médio da profundidade de penetração (m); t a duração do ensaio (segundos); erf^{-1} o inverso da função erro; c_d a concentração de cloretos para a qual ocorre a mudança de cor: $c_d \approx 0,07N$; c_0 a concentração de cloretos na solução catódica: $c_0 \approx 2N$.



Figura 5 – Teste de penetração de cloretos

2.2.4 Avaliação do ciclo de vida dos betões estudados

O principal objetivo deste estudo foi avaliar a performance ambiental dos diferentes betões estudados. O método utilizado segue as fases do ACV, de acordo com a norma ISO 14040, que fornece uma estrutura consensual, terminologia e fases metodológicas [17]. A descrição detalhada das fases e dos métodos utilizados e os resultados obtidos para a análise de ACV encontra-se descrita em [7].

3 Apresentação e discussão dos resultados

3.1 Resistência à compressão

Na Fig. 6 encontram-se apresentados os resultados obtidos para a resistência à compressão dos testes realizados aos 28, 90 e 180 dias de cura. Os valores apresentados são uma média de três

amostras para cada formulação de betão. Os valores de compressão para a mistura com 0,5 %m de CB eram semelhantes aos da referência, contudo verifica-se que um aumento do conteúdo de CB, conduziu a uma diminuição dos valores de compressão. Isto deve-se ao facto, de as CB não serem um material pozolânico, que com o aumento do seu conteúdo nas misturas, leva a uma diminuição sílica amorfa reativa que reaja com os compostos hidratados de cimento. Contudo, estas cinzas são muito alcalinas (pH numa classe de 11 a 13), com elevado teor de compostos de cálcio, fazendo com que esta cinza se comporte como um reservatório de alcalinidade, resultando numa boa sinergia com as CV [18,19].

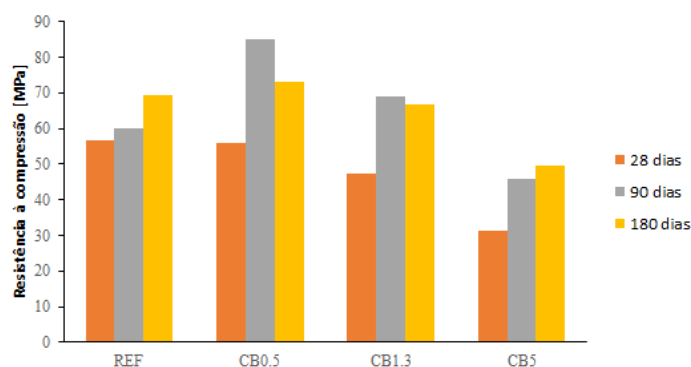


Figura 6 – Resistência à compressão das amostras de betão

3.2 Resistência à carbonatação

A carbonatação é um ataque químico, onde os agentes agressores são os compostos presentes nos gases atmosféricos, principalmente dióxido de carbono, dióxido de enxofre e dióxido de hidrogênio. Normalmente, esses gases são difundidos na forma de gás no sistema poroso, nas fissuras existentes na interface zona de transição entre a pasta de cimento e o agregado do betão, neutralizando os compostos alcalinos, resultando numa diminuição do pH, para valores inferiores a 9, levando à destruição da camada de proteção de passivação e permitindo a corrosão do reforço [20]. A análise da carbonatação consiste num teste acelerado com o objetivo principal de medir a resistência ao CO₂. A profundidade de carbonatação pode ser expressa em função da raiz quadrada do tempo de exposição, resultando numa tendência linear, sendo assim, possível determinar o coeficiente de carbonatação, apresentado na Fig. 7.

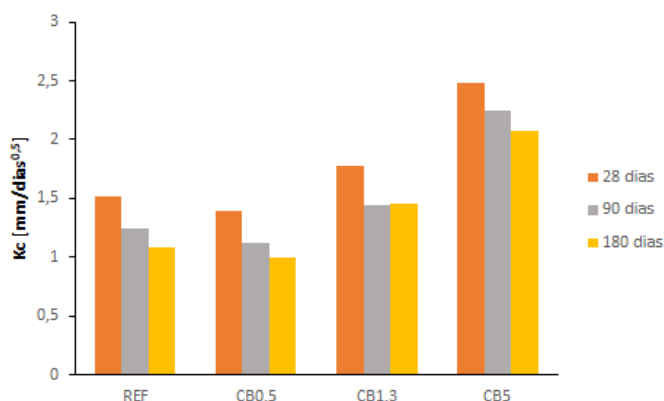


Figura 7 – Coeficiente de carbonatação dado pelo teste acelerado para cada composição

3.3 Resistência à Penetração de Cloretos

Na Fig. 8, os resultados médios dos coeficientes de difusão de cloreto são apresentados. Os resultados mostraram que as misturas REF e CB0.5 apresentaram os menores valores para o

coeficiente de penetração de cloretos. Isso pode ser causado pelo fato de as duas cinzas volantes apresentarem uma boa sinergia, neste nível de substituição de cimento, podendo indicar que nesta mistura existia uma maior quantidade de aluminatos que levam à fixação e redução do teor de íões de cloreto livres capazes de migrar para o betão, levando à diminuição do coeficiente de difusão [15]. Apesar da boa sinergia apresentada nesta mistura (CB0.5), um aumento no coeficiente de difusão foi observado com o aumento do teor de CB.

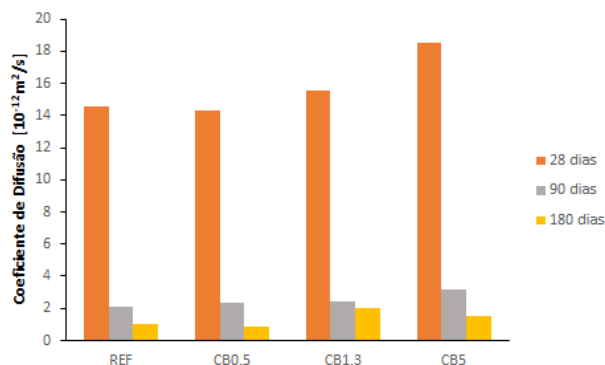


Figura 8 – Coeficientes de difusão de íões cloretos determinados para os betões em estudo

3.4 Análise de ciclo de vida

O estudo realizado mostrou o potencial impacto do betão, principalmente a parte relacionada com as emissões de CO_2 , é devido ao teor de cimento Portland. Os resultados também mostraram que é possível produzir betões com baixo teor de cimento Portland, com melhor desempenho ambiental, atingindo a compressão esperada satisfatória, sendo uma alternativa promissora em termos ambientais. Para além, dos bons resultados observados nas outras propriedades, é importante referir que as formulações de betão com 0,5 e 1,3 % em peso de substituição de cimento por CB apresentaram baixo desempenho ambiental, no entanto melhor desempenho ambiental do que o betão convencional. As questões ambientais relacionadas com estas duas composições devem-se ao uso de um maior teor de superplastificante. O efeito do superplastificante nos indicadores ambientais é conhecido, mas os resultados mostraram que é possível reduzir ligeiramente o teor de SP, sem ter um efeito negativo significativo na trabalhabilidade, mantendo os valores semelhantes aos da formulação de betão com 5 % em peso de CB. A diminuição do conteúdo de SP tem uma importante contribuição na melhoria do desempenho ambiental dessas duas misturas.

4 CONCLUSÕES

Os trabalhos desenvolvidos, nomeadamente a análise dos testes efetuados e dos resultados obtidos, destaca que é possível produzir betões com baixo teor de cimento, mas com propriedades semelhantes aos betões convencionais. Durante este estudo, foi possível concluir que as CB têm um efeito nas propriedades do betão com elevado teor de cinzas volantes, mas em alguns casos leva à produção de um material com resistência mecânica desejável, mas sempre com boa durabilidade. E apesar de em termos de impactes ambientais, a sua performance não ser o desejável, é preciso realçar que isto deve-se ao uso de superplastificante, e não diretamente relacionado com o conteúdo em CB. Mesmo assim, é importante referir que a performance ambiental destes betões é superior aos betões convencionais. Assim, uma das soluções para minimizar os problemas dos betões com elevados teores de cinza em ambientes sujeitos à penetração de cloretos pode ser a utilização de

pequenas quantidades de CB misturada com CV, pois estas cinzas apresentam uma boa sinergia e apresentam uma contribuição positiva na minimização da penetração dos cloretos. Para além disso, é sabido que está a ocorrer uma diminuição da produção de cinzas volantes de carvão, devido às metas estabelecidas a nível Europeu, em termos da diminuição da pegada de carbono dos diferentes países e setores, sendo por isso necessário encontrar alternativas a estes materiais, as cinzas de biomassa podem ser uma dessas alternativas, mas é necessário ainda um maior estudo destas cinzas e sua incorporação em betões.

AGRADECIMENTOS

Os autores querem agradecer à Fundação para a Ciência e Tecnologia (FCT) e ao Programa de Doutoramento em Eco-Construção e Reabilitação pelo apoio à bolsa de doutoramento (referência PD/BD/52661/2014). Este trabalho foi parcialmente financiado pela FCT/MCTES através de fundos nacionais (PIDDAC) no âmbito da Unidade de I&D Instituto para a Sustentabilidade e Inovação em Engenharia de Estruturas (ISISE), sob a referência UIDB/04029/2020.

REFERÊNCIAS

- [1] D. Satterthwaite, Cities' contribution to global warming: Notes on the allocation of greenhouse gas emissions, *Environ. Urban.* 20 (2008) 539–549. <https://doi.org/10.1177/0956247808096127>.
- [2] E. Gladek, T. Thorin, L. Verkooijen, V. Shirochenkova, S. Qiogley, *Circular Amsterdam: Spatial Implications*, (2017) 1–17.
- [3] F. Sariatli, Linear Economy Versus Circular Economy: A Comparative and Analyzer Study for Optimization of Economy for Sustainability, *Visegr. J. Bioeconomy Sustain. Dev.* 6 (2017) 31–34. <https://doi.org/10.1515/vjbsd-2017-0005>.
- [4] CE, Pacto Ecológico Europeu, 2019. <https://sustainabledevelopment.un.org/post2015/transformingourworld>.
- [5] H. Naderpour, M. Mirrashid, Estimating the compressive strength of eco-friendly concrete incorporating recycled coarse aggregate using neuro-fuzzy approach, *J. Clean. Prod.* 265 (2020) 121886. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.121886>.
- [6] B. Konstantinovas, N.V. Bento, T. Sanches, *Economia Circular no Setor da Construção Civil I - Ciclo dos materiais*, 2019. www.ccdr-lvt.pt.
- [7] E.R. Teixeira, R. Mateus, A.F. Camões, L. Bragança, F.G. Branco, Comparative environmental life-cycle analysis of concretes using biomass and coal fly ashes as partial cement replacement material, *J. Clean. Prod.* 112 (2016) 2221–2230. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2015.09.124>.
- [8] J.M. Franco de Carvalho, T.V. de Melo, W.C. Fontes, J.O. dos S. Batista, G.J. Brigolini, R.A.F. Peixoto, More eco-efficient concrete: An approach on optimization in the production and use of waste-based supplementary cementing materials, *Constr. Build. Mater.* 206 (2019) 397–409. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.02.054>.
- [9] E.R. Teixeira, A. Camões, F.G. Branco, Valorisation of wood fly ash on concrete, *Resour. Conserv. Recycl.* 145 (2019) 292–310. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2019.02.028>.
- [10] E.R. Teixeira, A. Camões, F.G. Branco, J.C. Matos, Effect of biomass fly ash on fresh and hardened properties of high volume fly ash mortars, *Crystals.* 11 (2021) 1–21. <https://doi.org/10.3390/cryst11030233>.

- [11] E.R. Teixeira, A. Camões, F.G. Branco, J.B. Aguiar, R. Figueiro, Recycling of biomass and coal fly ash as cement replacement material and its effect on hydration and carbonation of concrete, *Waste Manag.* 94 (2019) 39–48. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2019.05.044>.
- [12] E.R. Teixeira, R. Mateus, A. Camões, F.G. Branco, Quality and durability properties and life-cycle assessment of high volume biomass fly ash mortar, *Constr. Build. Mater.* 197 (2019) 195–207. <https://doi.org/10.1016/J.CONBUILDMAT.2018.11.173>.
- [13] NP EN 12390-3, Norma Portuguesa - Ensaio do betão endurecido - Parte 3: Resistência à compressão dos provetes de ensaio. Portuguese Norm - Testing hardened concrete - Part 3: Compressive strength of test specimens, IPQ - Instituto Português da Qualidade, 2003.
- [14] LNEC E 391, Especificação LNEC - Betões - Determinação da resistência à carbonatação. LNEC Specification - Concrete - Determination of carbonation resistance, Laboratório Nacional de Engenharia Civil - Portugal, 1993.
- [15] LNEC E 463, Especificação LNEC - Determinação do coeficiente de difusão dos cloretos por migração em regime não estacionário. LNEC Specification - Determination of chloride migration coefficient from non-steady-state migration experiments), Laboratório Nacional de Engenharia Civil - Portugal, 2004.
- [16] E.R. Teixeira, High Volume Coal and Biomass Fly Ash Eco-Efficient Concrete, School of Engineering, University of Minho, 2019.
- [17] ISO 14040, Environmental management -- Life cycle assessment -- Principles and framework, 2006.
- [18] A.U. Elinwa, S.P. Ejeh, Effects of the Incorporation of Sawdust Waste Incineration Fly Ash in Cement Pastes and Mortars, *J. Asian Archit. Build. Eng.* 3 (2004) 1–7. <https://doi.org/10.3130/jaabe.3.1>.
- [19] C.C. Ban, M. Ramli, The implementation of wood waste ash as a partial cement replacement material in the production of structural grade concrete and mortar : An overview, *Resour. Conserv. Recycl.* 55 (2011) 669–685. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2011.02.002>.
- [20] R. Reis, R. Malheiro, A. Camões, M. Ribeiro, Carbonation Resistance of High Volume Fly Ash Concrete, *Key Eng. Mater.* 634 (2014) 288–299. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/KEM.634.288>.



Reabilitar & Betão Estrutural 2020

Congresso Nacional | Lisboa | LNEC
3 a 5 de novembro de 2021

Editores

Luís Oliveira Santos, Eduardo Júlio, José Sena Cruz

APEE
Associação Portuguesa
de Engenharia de Estruturas

GPBE Grupo
Português
de Betão
Estrutural

PATROCÍNIOS

PLATINA



Dá forma às ideias

OURO



PRATA



BRONZE



Reabilitar & Betão Estrutural 2020

Congresso Nacional | Lisboa | LNEC
3 a 5 de novembro de 2021

Editores

Luís Oliveira Santos, Eduardo Júlio, José Sena Cruz

Aviso Legal / Legal Notice

Não é permitida a reprodução total ou parcial deste livro, nem o registo em suporte informático, nem a transmissão através de qualquer processo, eletrónico ou mecânico, sem a prévia autorização por escrito dos titulares dos direitos da edição.

No part of this work covered by the copyright hereon may be reproduced or used in any form or by any means – graphic, electronic, or mechanical, including photocopying, recording, taping, web distribution, information storage and retrieval systems, or in any other manner – without the written permission of the publisher.

Este livro foi elaborado a partir da reprodução dos originais enviados pelos autores. Os editores não assumem a responsabilidade pelo conteúdo nem por possíveis incorreções do texto.

The publisher makes no representation, express or implied, with regard to the accuracy of the information contained in this book and cannot accept any legal responsibility or liability for any errors or omissions that may be made.

Título do congresso/Title: Congresso Reabilitar & Betão Estrutural 2020

Autor/Author: Vários

Editores/Editors: APEE e GPBE

Edição/Editors: Luís Oliveira Santos, Eduardo Júlio e José Sena Cruz

Paginação e pré-impressão/Paging and prepress: Comissão Organizadora do Reabilitar & Betão Estrutural 2020

Produção/Production: LNEC

Capa/Cover's design: LNEC

© Laboratório Nacional de Engenharia Civil (LNEC) – Todos os direitos reservados

ISBN: 978-989-53078-1-4

ÍNDICE

Prefácio	IX
Comissões	X
Temas	XI

Palestras

Conservação das estruturas do património cultural: Digitalização, sismos, aplicações e outros desafios	3
<i>P. Lourenço</i>	
Normas para intervenções em estruturas existentes	13
<i>J. Appleton</i>	
Acompanhamento dos processos de deterioração das barragens portuguesas afetadas por reações expansivas do betão	43
<i>A. L. Batista</i>	

Obras Especiais

Reabilitação da Ponte Hercílio Luz em Florianópolis, Brasil	77
<i>J.P. Lopes</i>	
Reabilitação e reforço de palacete pré-pombalino no Campo dos Mártires da Pátria, em Lisboa	91
<i>J. Almeida</i>	
Randselva bridge and Drawingless projects. Planning and building bridges solely based on BIM models	101
<i>Ø. Ulvestad, T. Vieira</i>	

Sessões Especiais

SE1 - Novas tecnologias na reabilitação e reforço de estruturas de betão

Resistência ao corte de vigas e lajes reforçadas com uma camada de UHPFRC	115
<i>M. Pimentel, A. Sine, S. Nunes</i>	
Resistência ao punçoamento de lajes fungiformes reforçadas com UHPFRC	125
<i>M. Pimentel, A. Sine, S. Nunes</i>	
Comportamento ao fogo de faixas de laje de betão armado reforçadas com diferentes técnicas de colagem de laminados de CFRP – EBR, NSM e CREAtE	135
<i>A.S. Azevedo, J.P. Firmo, J.R. Correia, C. Chastre, H. Biscaia, N. Franco</i>	
Durabilidade da aderência da ligação betão-CFRP com os sistemas EBR e NSM sob efeito de envelhecimento natural	147
<i>J.R. Cruz, L. Correia, S. Cabral-Fonseca, J. Sena-Cruz</i>	
Avaliação da durabilidade de adesivos estruturais utilizados na reabilitação de estruturas de betão por colagem de laminados de CFRP	159
<i>S. Cabral-Fonseca, J. Correia</i>	
Comportamento ao fogo de faixas de laje de betão armado reforçadas com laminados de cfrp pré-esforçados aplicados de acordo com a técnica NSM	169
<i>A.S. Azevedo, J.P. Firmo, J.R. Correia, R.M. Firouz, J.A.O. Barros</i>	

SE2 - Valorização de resíduos para a produção de betão sustentável

Avaliação da ligação entre betão com baixa dosagem de cimento e com agregados reciclados e betão de ultraelevada durabilidade	185
<i>K. Robalo, H. Costa, R. Carmo, E. Júlio</i>	
Comportamento em serviço de vigas em betão ecoeficiente e de durabilidade melhorada	195
<i>K. Robalo, R. Carmo, H. Costa, J. Valença, E. Júlio</i>	

Desempenho mecânico e durabilidade de matrizes cimentícias otimizadas com baixo teor de cimento e diferentes adições	205
<i>E. Soldado, C. Antunes, H. Costa, R. Carmo, E. Julio</i>	
Argamassas de cimento reciclado: Caracterização física e mecânica	215
<i>S. Real, A. Carriço, J.A. Bogas</i>	
Avaliação do potencial do uso de cinzas volantes de biomassa na produção de betões	227
<i>E.R. Teixeira, A. Camões, F.G. Branco</i>	
Cimentos reciclados termoativados: Estado da arte	237
<i>A. Carriço, J.A. Bogas, M. Guedes</i>	
Avaliação do desempenho de argamassas com areias do leito fluidizado de centrais de queima de biomassa	249
<i>C. Gonilho-Pereira, J. Deloroso, A. Betioli</i>	
Caracterização do óxido de magnésio e da sua incorporação em materiais cimentícios: Revisão bibliográfica	259
<i>M. Bravo, L. Evangelista, J. Pacheco, J. Brito, J. Forero</i>	
Comportamento de argamassas com substituição parcial de cimento por óxido de magnésio de diferentes origens	267
<i>M. Bravo, L. Evangelista, J. Pacheco, J. Brito, J. Forero</i>	
Argamassas com incorporação de agregados reciclados de RCD sujeitos a fixação de CO ₂	279
<i>R.I. Gomes, C.B. Farinha, R. Veiga, J. Brito, P. Faria</i>	
Evolução da hidratação e da microestrutura em pastas de cimento reciclado	291
<i>A. Carriço, J.A. Bogas, J. Tenza-Abril</i>	

SE3 - Inovação no projeto de estruturas baseada na metodologia BIM

Projecto de estruturas apoiado na metodologia BIM: Pormenorização de armaduras	305
<i>A.Z. Sampaio, N.R. Borges, A.M. Gomes</i>	
Análise da capacidade de interoperabilidade de plataformas BIM no projecto de estruturas	315
<i>A.Z. Sampaio, A.M. Gomes, T.T. Farinha, J.P. Diniz, P.M. Serra</i>	
Abordagem BIM ao estudo de viabilidade do aproveitamento hidroelétrico de Kholombidzo	325
<i>P. Serra, A. Amador, A.P. Silva</i>	
Plano de execução BIM, maturidade e políticas de difusão, aplicadas ao projeto de estruturas	335
<i>M.J.F. Silva, P. Couto</i>	
Aplicação do BIM na avaliação de pavimentos aeroportuários: definição de requisitos IFC para interoperabilidade	347
<i>L. Guerra, M.J.F. Silva, P. Couto, S. Fontul</i>	

SE4 - Deteção e diagnóstico de anomalias e soluções de intervenção em barragens

Injeções de caldas cimentícias no âmbito de operações de reabilitação da superestrutura de barragens de betão - Parte 1: Revisão de literatura	359
<i>J.C. Silva</i>	
Estudo do processo de fendilhação numa barragem abóbada	369
<i>N.A.S. Leitão</i>	
Desafios da identificação automática de fendas em barragens de betão com redes neuronais	379
<i>B.O. Santos, J. Valença, J. Costeira, E. Julio</i>	
Injeções de caldas cimentícias no âmbito de operações de reabilitação da superestrutura de barragens de betão - Parte 2: Casos de sucesso	391
<i>J.C. Silva</i>	
Utilização de modelos de aprendizagem automática do tipo random forest na interpretação dos deslocamentos horizontais observados na barragem do Alto Lindoso	403
<i>J.S. Cardoso, J. Mata, J. Almeida</i>	
Metodologia de avaliação da deterioração das alvenarias das barragens provocada pela lixiviação das argamassas de ligação dos blocos de pedra	415
<i>B.A. Jalles, A.L. Batista, J.V. Lemos</i>	

SE5 - Construção, modificação e reabilitação de barragens

Análise dos impactos a prazo-custo de trabalhos de construção civil na empreitada “Instalação de comportas no descarregador de cheias da Barragem de Pretarouca”	433
<i>Bruno Barbosa</i>	

Reabilitação da barragem de Luachimo	443
<i>P. Soares, V. Gama, F. Naguindás</i>	
Dimensionamento estrutural da barragem de Balakot. Aproveitamento hidroelétrico de Balakot 300MW	455
<i>F. Roberto, G.S. Frias, A. Pinheiro</i>	
Descarregador de cheias complementar da barragem de Caniçada. Conceção e execução	465
<i>F. Roberto, G.A. Frias, M. Oliveira, J.S. Gonçalves</i>	
Reabilitação e reforço estrutural da barragem de Djorf Torba	479
<i>G.S. Frias, F. Roberto, L. Pimenta</i>	
Avaliação da probabilidade de fendilhação devido à ação térmica anual. Aplicação à barragem de Alqueva ...	489
<i>C. Serra</i>	

SE6 - Análise e interpretação do comportamento de barragens

Modelos híbridos de separação de efeitos do tipo HSCT-FE para estudo do comportamento de barragens abóbada sob ações expansivas	501
<i>M. Rodrigues, S. Oliveira, J. Proença</i>	
Metodologia para interpolação em todo o domínio de grandezas monitorizadas num número discreto de pontos de barragens de betão utilizando malhas de elementos finitos	511
<i>J.P. Gomes, A.L. Batista</i>	
Análise e interpretação do comportamento observado da barragem de Ermida após o início do primeiro enchimento da albufeira	523
<i>A.T. Castro, I.F. Dias</i>	
Análise e interpretação do comportamento observado das barragens de Ferradosa e Olgas durante o primeiro enchimento da albufeira e nos primeiros 10 anos de exploração	537
<i>I.F. Dias, A.L. Batista, J.A.B. Paixão</i>	
Identificação e modelação dos efeitos das expansões do betão na barragem da Bemposta	549
<i>R. Rebelo, I.F. Dias, A.L. Batista</i>	
Observação e análise de extensões e tensões na barragem de Cahora Bassa	561
<i>M. Rodrigues, S. Oliveira, J. Proença, E. Carvalho, P. Mendes</i>	

SE7 - Monitorização e análise do comportamento dinâmico de barragens de betão

Análise de barragens abóbada sob ações sísmicas de grande intensidade. Movimentos de juntas e roturas no betão	573
<i>A. Alegre, S. Oliveira, J. Proença, P. Mendes</i>	
Deteção de danos baseada em vibrações: Aplicação a uma barragem de betão	583
<i>S. Pereira, F. Magalhães, A. Cunha, J. Gomes, J. Lemos, J. Paixão</i>	
Interação dinâmica fluido/estrutura em barragens de betão utilizando uma formulação de Lagrange na discretização dos elementos de fluido	593
<i>C. Almeida, N.M. Azevedo, M.L.B. Farinha, J.R. Almeida, S. Oliveira</i>	
Monitorização e modelação do comportamento dinâmico da barragem do Cabril no período 2008-2020	603
<i>S. Oliveira, A. Alegre, I. Ferreira, P. Mendes, J. Proença</i>	
Comportamento dinâmico da barragem de Cahora/Bassa sob excitação ambiente e sob ações sísmicas	613
<i>A. Alegre, S. Oliveira, E. Carvalho, P. Mendes, J. Proença</i>	
Avaliação do comportamento dinâmico da barragem de Foz Tua com base em métodos experimentais e numéricos	623
<i>J.P. Gomes, J.V. Lemos</i>	

Comunicações

C1 - Patologia, Inspeção e Diagnóstico

Perda de resistência do betão por execução de carotes	639
<i>A.B. Ribeiro, A. Monteiro</i>	
Identificação de dano numa escultura com base num ensaio de vibração ambiental	649
<i>I. Caetano</i>	

Betões estruturais de agregados leves sujeitos a 5 anos de exposição em ambiente marítimo	659
<i>S. Real, J.A. Bogas</i>	
Desenvolvimento de metodologia para reabilitação de abordagem sustentável	671
<i>C. Antunes, J. Gonçalves, P. Maranhã, H. Costa</i>	
Avaliação da capacidade de carga estrutural da casa de vidro da Arquitecta Lina Bo Bardi – Projeto Keep it Modern – Getty Foundation	681
<i>R. Bento, J.A. Rossignolo</i>	
Sistema de gestão do estado de conservação de obras de arte a nível municipal	691
<i>L. Ostetto, H. Rodrigues, P. Fernandes</i>	
Caracterização de argamassas e betões de edifícios do século XX galardoados com o Prémio Valmor de Arquitectura. Estado de conservação e contributos para a sua salvaguarda	703
<i>L. Almeida, A.S. Silva, M.R. Veiga, J. Mirão, M. Vieira</i>	
Avaliação da segurança estrutural da cobertura de um reservatório de água do século XIX	715
<i>M. Arruda, J.R. Correia, J.G. Ferreira, F. Branco, N.A. Reis</i>	
Monitorização da integridade estrutural da ponte ferroviária das pirâmides	731
<i>P. Oliveira, J. Santos, P. Silveira, M. Pipa, L. Freire</i>	
Masonry walls of buildings with reinforced concrete structure - detection of cracking due to the effect of temperature variations through NDT techniques	743
<i>J. Dias, L. Matias, M. Henriques</i>	
Metodologia para prevenir reações químicas expansivas no betão: Especificação LNEC E 461:2021	753
<i>J. Custódio, A.B. Ribeiro, D. Costa, A.S. Silva, A. Gonçalves</i>	
Identificação dos efeitos das reações expansivas do betão em pilares através de nivelamentos geométricos .	767
<i>X. Min, J.N. Lima, L.O. Santos</i>	
Avaliação do funcionamento estrutural do tabuleiro em betão armado da Ponte-Cais do Porto de Pemba	779
<i>N. Traquinho, A. Dimande, P. Jaquecene, R.C. Barros</i>	
Assessment of anomalies related to vertical deformations in heritage buildings with reinforced concrete structure and infill masonry walls	789
<i>J.M. Dias</i>	
Monitorização de vigas de betão armado reforçadas com UHPFRC através de fotogrametria	803
<i>D. Valente, A. Sine, J. Valença, M. Pimentel</i>	
Aplicação e estudo comparativo de metodologias de avaliação de estruturas existentes de betão armado	815
<i>S.P.N. Moura, J.C. Pantoja, S. Galimi</i>	
Estruturas de betão danificadas por incêndio: Avaliação de danos e técnicas de reparação	829
<i>A.L. Camargo, J.P.C. Rodrigues</i>	
Monitorização avançada da estrutura de ampliação do Aeroporto da Madeira	839
<i>L.O. Santos, M. Xu, F. Barros, S. Aguiar, P. Sousa, P. Tavares, P. Moreira, E. Franco</i>	
Análise do efeito piezoresistivo em compósito cimentício autossensível sob diferentes disposições de carregamento uniaxial	849
<i>J.B.L.P. Silva, R.C.C. Lintz, L.A. Gachet</i>	
Aplicação de técnicas não destrutivas na determinação do teor de humidade interna do concreto	859
<i>L.C. Nascimento, A. Araujo, V.A. Quarcioni</i>	
Conceção de um modelo laboratorial de uma ponte para o desenvolvimento de um sistema SHM	869
<i>B. Tavares, F. Cavadas, C. Rodrigues, C. Félix</i>	

C2 - Materiais e Produtos para Estruturas Duráveis e Sustentáveis

Tensão de rotura de aços de varões A400 para betão armado. influência da origem dos varões na sua distribuição estatística	883
<i>A.M. Baptista, J. Filipe</i>	
Resistência dos aços de cordões para betão pré-esforçado. Influência da origem dos cordões na sua distribuição estatística	893
<i>A.M. Baptista, J. Filipe</i>	
Tensão de cedência de aços de varões A500 para betão armado. Influência da origem dos varões na sua distribuição estatística	903
<i>A.M. Baptista, J. Filipe</i>	
Aderência de varões de aço nervurados para betão armado. Influência da origem dos varões na distribuição estatística da altura das nervuras	913
<i>A.M. Baptista, J. Filipe, A.S. Louro</i>	

Análise experimental das ligações entre os elementos usados na produção de piscinas modulares	925
<i>R. Martins, D. Antunes, R. Carmo, H. Costa, E. Júlio</i>	
Piscinas modulares de elevada durabilidade produzidas com um betão leve e com reduzida dosagem de cimento	935
<i>D. Antunes, R. Martins, R. Carmo, H. Costa, E. Júlio</i>	
Método para restauro em superfícies de betão aparente: O caso do pavilhão do conhecimento, em Lisboa	947
<i>J. Miranda, J. Valença, H. Costa, E. Júlio</i>	
Avaliação da durabilidade de argamassas de restauro para património em betão	957
<i>J. Miranda, J. Valença, H. Costa, E. Júlio, R. Carmo</i>	
The revolution of concrete to concrete connections with post-installed rebar	969
<i>B. Campelo, J. Correia, J. Appl</i>	
Migração de cloretos – Estudo paramétrico experimental	979
<i>F.G. Branco, J.M. Ortega, L. Pereira, L. Godinho</i>	
Influence of lime in mortar on strength and stiffness of brick masonry	991
<i>C. Briceño, M. Ramesh, M. Azenha, G. Vasconcelos, P. Lourenço</i>	
Ensaio de resistência ao fogo em faixas de laje armadas com varões GFRP com acabamento em areia	1001
<i>I.C. Rosa, J.P. Firmo, J.R. Correia</i>	
Estudo experimental do comportamento de colunas de betão armado com varões de GFRP sob diferentes condições de carregamento	1011
<i>W.M. Souza, J. Firmo, J. Correia, J. Almeida</i>	
Alkali activated municipal solid waste incinerator bottom ashes: Optimization of the alkali activator	1021
<i>R. Carvalho, R.V. Silva, J. Brito, Y. Pereira</i>	
Estruturas de betão armado com varões de FRP: Parâmetros que influenciam a aderência varão/betão	1031
<i>E. Nepomuceno, J. Sena-Cruz</i>	
Prevenção e mitigação da carbonatação do betão armado com sistemas de proteção superficial	1043
<i>H.M. Silva, S. Cabral-Fonseca, M.P. Rodrigues</i>	
Estudo experimental da capacidade de carga de lajes lisas com aberturas e moldadas em concreto com adição de fibras de aço	1053
<i>L. Oliveira, L. Trautwein, L.C. Almeida</i>	
Comportamento pós-fendilhação de betão reforçado com fibras exposto a temperaturas elevadas	1063
<i>C. Frazão, F. Melo, L. Lourenço, J. Barros</i>	
Caracterização do comportamento à torção de elementos de secção aberta em betão ecoeficiente reforçado com varões de GFRP e de aço	1073
<i>V. Almeida, E. Soldado, H. Costa, R. Carmo, P. Maranhã, E. Júlio, L. Correia</i>	
Ensaio acelerado de avaliação de anodos galvânicos para reparo de estruturas de concreto	1085
<i>A. Araujo, T.G. Rosa, N.L. Almeida</i>	
Aço-carbono zincado e aço ligado com armadura de estruturas de concreto: Análise hierárquica sob ponto de vista econômico, técnico e ambiental	1095
<i>M. Martins, A. Araujo, Z. Panossian</i>	

C3 - Análise, Modelação e Normalização

Capacidade de suporte de fundações profundas e consumo de concreto e aço em blocos sobre estacas	1109
<i>A.C.R. Lozovey, F.A. João, N.H. Azevedo</i>	
Análise comparativa dos métodos de previsão da capacidade de suporte de estacas tipo hélice contínua	1119
<i>A.C.R. Lozovey, L.F.P. Sales</i>	
Comportamento sísmico da ligação laje-pilar considerando diferentes soluções de reforço	1129
<i>B. Isufi, R. Marreiros, A. Ramos, V. Lúcio</i>	
Comportamento sísmico de ligações laje-pilar com variação da taxa de armadura de flexão	1139
<i>M. Rossi, B. Isufi, A. Ramos</i>	
Ação do vento e ação sísmica para situações de projeto transitórias	1151
<i>L. Jacinto, L.O. Santos</i>	
Influência das tolerâncias na resistência de elementos de betão armado	1161
<i>C. Fernandes, J. Vinagre, C. Gonilho-Pereira</i>	
Modelação numérica de uma intervenção de reabilitação num edifício de “Placa”	1171
<i>A.S. Louro, M.P. Alves, H. Cruz</i>	

Estudo do efeito combinado da deformação impedida e do carregamento externo em lajes de betão armado: Resultados de um programa experimental	1183
<i>J. Gomes, J. Granja, C. Sousa, C. Ferreira, R. Faria, D. Schlicke, M. Azenha</i>	
Simulação numérica do programa experimental para estudo do efeito combinado da deformação impedida e carregamento externo em lajes de betão armado	1195
<i>C. Ferreira, J. Gomes, C. Sousa, J. Granja, M. Azenha, D. Schlicke, R. Faria, M. Azenha</i>	
Apoio à verificação de projeto de estruturas em BA com base em análise não linear simplificada	1205
<i>J. Ferreira, M. Azenha, N. Mendes</i>	
Ensaio de flexão para fora do plano em paredes resistentes reforçadas com revestimentos armados	1215
<i>A. Marques, J.G. Ferreira, P. Candeias, M.R. Veiga</i>	
Análise probabilística da aceleração vertical em tabuleiros de pontes ferroviárias de alta velocidade	1225
<i>G. Ferreira, A. Silva, A.A. Henriques, P. Montenegro, D. Ribeiro, R. Calçada</i>	
Modelação numérica do comportamento ao fogo de lajes de betão armado com varões de GFRP com acabamento em areia	1235
<i>A.P.C. Duarte, I.C. Rosa, M.R.T. Arruda, J.P. Firmo, J.R. Correia</i>	
Avaliação do comportamento em serviço com modelos de campos de tensões contínuos	1245
<i>M. Ferreira, J. Almeida, M. Lourenço</i>	
Modelação numérica de colunas de betão armado com varões de GFRP sob diferentes condições de carregamento	1255
<i>W. Souza, J. Firmo, J. Correia, J. Almeida</i>	
Ponte atirantada com tabuleiro metálico sobre o rio Limpopo: Modelação numérica e validação experimental	1267
<i>N. Traquinho, A. Dimande, D. Rodrigo Ribeiro, R.A.B. Calçada</i>	
Curvas de fragilidade para edifícios industriais pré-fabricados em betão armado em Portugal	1281
<i>R. Sousa, N. Batalha, V. Silva, P. Fernandes, H. Varum, H. Rodrigues</i>	
Reforço sísmico de um edifício existente com isolamento de base	1291
<i>J.L. Garcia</i>	
Ligação de consolas metálicas a estruturas de betão	1301
<i>J. Fonseca, C. Pinto</i>	
Análise numérica da resistência ao fogo após um sismo em estruturas de betão armado	1311
<i>H. Vitorino, P.V. Real, H. Rodrigues, C. Couto</i>	
Modelo para o comportamento de elementos betão armado reforçado com fibras sujeitos a esforços no plano	1321
<i>R. Valente, M. Pimentel</i>	
Impacto do sismo de 28 de fevereiro de 1969: Comportamento do posto de polícia de viação e trânsito em Lagos	1331
<i>J.M.C. Estêvão, C. Oliveira, R. Ferreira</i>	
Análise sísmica de um edifício de 11 pisos com painéis pré-fabricados de alvenaria do sistema construtivo FIORIO	1341
<i>A. Silva, C. Serra, J.L. Garcia</i>	
Avaliação do efeito da nova legislação sísmica brasileira na segurança de pontes existentes	1351
<i>C. Interlandi, L.O. Santos, L.F. Martha, S.H.C. Santos</i>	
Avaliação da segurança sísmica em edifícios existentes. Aplicação da regulamentação existente	1363
<i>A. Costa, V. Bernardo</i>	
Estratégias de gestão de riscos naturais em edifícios e obras de betão armado com base na ISO 22485	1375
<i>M. Duarte, N.M. Almeida, M.J.F. Silva, F. Salvado</i>	
Estudos de cenários de rotura por deslizamento em barragens de betão com modelos de fenda discreta	1385
<i>M.L.B. Farinha, N.M. Azevedo, J.R. Almeida, S. Oliveira, F. Gouveia</i>	
Modelação de paredes de alvenaria de pedra tradicional com um modelo de partículas	1395
<i>N.M. Azevedo, F.F.S. Pinho, I. Cismasiu, M. Bergonse de Souza</i>	
Avaliação experimental dos efeitos das restrições na resistência ao fogo de vigas de concreto armado	1405
<i>G.M.L. Albuquerque, J.P.C. Rodrigues, V.P. Silva</i>	
Diferenciação de níveis de resposta de estruturas de betão armado a eventos naturais extremos	1415
<i>N.M. Almeida, M.J.F. Silva, F. Salvado</i>	
Observação e análise dos efeitos estruturais das expansões do betão na barragem de Fagilde	1427
<i>J.P. Gomes, A.L. Batista, S. Sousa</i>	

Determinação da armadura para controlo da fissuração vertical em muros de betão restringidos pela fundação	1439
<i>L. Coutinho, C. Ferreira, C. Sousa, M. Azenha, R. Faria</i>	
Implementation of GFRP profiles in rehabilitation: Web-crippling design	1449
<i>L. Almeida-Fernandes, N. Silvestre, J.R. Correia</i>	

C4 - Realizações: Obras Novas e de Reabilitação

Soluções de reforço estrutural e de fundação de uma caverna sob edifícios em Lisboa	1465
<i>R. Justiniano, A. Pinto, N. Dias, A. Pinto</i>	
Theemswegtracé DT2 - Tabuleiros pré-esforçados em u em pontes ferroviárias em curva e com viés	1475
<i>R. Afecto, F. Nunes, F. Varino, N. Lopes</i>	
Pontes e viadutos rodoviários com tabuleiros pré-fabricados na BR-381 e na BR-101 (Brasil). Conceção, projeto e obra	1487
<i>N. Travassos, A. Costa, J. Appleton, R. Delgado</i>	
Pontes sobre o rio Piracicaba na BR381 (Minas Gerais - Brasil) - Conceção, projeto e obra	1497
<i>R. Delgado, A. Costa, J. Appleton, N. Travassos</i>	
Reforço da laje de piso da loja Leroy Merlin – Amadora	1507
<i>R. Bastos, A. Sousa, J.P. Prata</i>	
A reabilitação e o reforço dos viadutos de Agudim e Arunca e da ponte do Tâmega	1517
<i>P. Cabral, S. Bispo, A. Rito</i>	
Demolição por derrubamento das chaminés da central termoelétrica de Setúbal	1527
<i>R.V. Rodrigues, J.M. Alexandre, M.C. Costa, P.F. Garcia, H.E.M. Schürr, J. Nunes</i>	
Reforço de potência do aproveitamento hidroelétrico de Luachimo	1537
<i>P. Soares, V. Gama, F. Naguindás</i>	
Reforço sísmico da sede da Nestlé Portugal	1549
<i>J. Almeida, F. Reis, P. Garcia, L. Alvarez, A. Pinheiro</i>	
Alteração do sistema estrutural da ponte Eiffel na praia do Ribatejo	1561
<i>D. Gama, M. Lourenço</i>	
Reabilitação e reforço da Ponte do Caia - Empreendimento de modernização da linha do Leste	1571
<i>E. Gonçalves, F. Vasques, C. Ferraz, A. Correia</i>	
Ponte sobre o rio Sado na Autoestrada A26 – Subconcessão do Baixo Alentejo	1581
<i>C. Ferraz, F. Vasques, E. Gonçalves, A. Correia</i>	
A reabilitação estrutural de um edifício na Rua Vitor Cordon	1591
<i>J.L. Garcia, J. Carvalho</i>	
Reabilitação e reforço da ponte sobre o rio Almargem ao km 138+750 da ER125	1601
<i>J. Appleton, A. Costa, H. Rodrigues</i>	
Reabilitação, reconstrução e reforço do convento de Jesus em Viana do Alentejo	1613
<i>V. Appleton, H. Rodrigues</i>	
O projecto de substituição dos tirantes da ponte Edgar Cardoso	1625
<i>A. Rito, P. Cabral, L. Xavier, T. Abecasis</i>	
Reabilitação de edifício da Fundação D. Manuel II	1635
<i>F.D. Borges, M.S. Lourenço</i>	
Reabilitação e reforço do pontão do Jardim Botânico do Palácio Nacional de Queluz	1647
<i>A. Gomes, F. Virtuoso, M. Alves, A. Quinhones, R. Tomaz</i>	
Reabilitação e reforço do tabuleiro da ponte sobre a ribeira do Garvão	1657
<i>F. Virtuoso, A. Gomes, T. Rodrigues, A. Quinhones, R. Tomaz</i>	
Pontes do Criz I e II na EN234 – Reforço dos pilares e fundações	1667
<i>M. Veloso, M. Mendes</i>	
Reconversão do antigo edifício AEG	1677
<i>M. Lourenço, M. Afonso</i>	
Reabilitação do edifício Jornal de Notícias no Porto	1691
<i>H. Marques, J. Cunha, M. Cardoso</i>	
Reabilitação de hotel no Sul de Portugal	1703
<i>H. Marques, J. Cunha, M. Cardoso, H. Almeida</i>	
Seismic isolation protection system for the 1081-Bed Eskişehir city hospital in Turkey	1713
<i>P. Huber, L. Paroli, U. Kruzel, H. Miguel</i>	

Avaliação e recuperação das estruturas metálicas da Ponte Arquiteto Wilson Campos Júnior	1723
<i>A. Santos, J. Vitório, J. Matos</i>	
Solução de reabilitação, recalce e reforço de uma estrutura acostável para instalação de um elevador para navios de 9000 toneladas	1733
<i>P.M. Ramos, R. Costa, J. Cabral, M. Rocha, L. Esteves</i>	

Prémio Jovens Mestres

Projeto de ensoleiramento geral combinado com pré-esforço e melhoramento do solo - Aplicação ao caso de hangares para aeronaves de grande porte	1747
<i>P. Caseiro, J. Santos, R. Ramos, A. Costa</i>	
Apoio à verificação de projeto de estruturas em BA com base em análise não linear simplificada	1757
<i>J. Ferreira, M. Azenha, N. Mendes</i>	
Irregularidades estruturais no dimensionamento sísmico de edifícios de betão armado: Discussão de exigências regulamentares e casos de estudo	1767
<i>A. Lima, J. Melo, H. Varum</i>	
Aderência entre varões de aço e betão com baixa dosagem de ligante e incorporação de agregados reciclados	1781
<i>T. Pereira, A. Louro, H. Costa, E. Júlio</i>	
Structural design of transfer structures	1793
<i>G. Ribeiro, J. Almeida, P. Lobo</i>	

PREFÁCIO

Num contexto internacional marcado pela necessidade de uma maior atenção às questões da sustentabilidade e pelos desafios associados às alterações climáticas, e numa conjuntura nacional caracterizada por uma intensa atividade de reabilitação urbana, com crescentes desafios colocados na recuperação de obras públicas, e ainda na sequência de recentes e relevantes alterações regulamentares, a Associação Portuguesa de Engenharia de Estruturas (APEE) e o Grupo Português de Betão Estrutural (GPBE) decidiram organizar conjuntamente o Congresso Nacional Reabilitar & Betão Estrutural 2020. Este Congresso surge, assim, na continuidade dos Encontros Nacionais de Betão Estrutural, promovidos bienalmente pelo GPBE, cuja primeira edição remota a 1986, e dos Encontros Nacionais sobre Conservação e Reabilitação de Estruturas (REPAR 2000 e Reabilitar 2010), organizados pela APEE.

O Congresso Nacional Reabilitar & Betão Estrutural 2020 tem por objetivo ser um fórum privilegiado de divulgação e discussão conjunta dos temas habitualmente tratados separadamente nos dois eventos referidos, reunindo as realizações mais recentes e inovadoras, tanto no domínio do betão estrutural, como no campo da reabilitação de estruturas de qualquer tipo de material, designadamente de alvenaria, madeira, aço ou betão. Pretende ser um espaço de debate de ideias sobre os riscos e os desafios do futuro das estruturas, mobilizando para o efeito os profissionais de engenharia e de arquitetura, as empresas do sector, donos-de-obra, gabinetes de projeto, universidades, politécnicos, laboratórios e unidades de investigação científica e desenvolvimento tecnológico. São abordadas as vertentes dos materiais e produtos, normalização, projeto, execução e investigação científica, tendo em conta as atuais prioridades, nacionais e internacionais, em termos de desempenho, durabilidade, sustentabilidade e resiliência das estruturas. O evento inclui ainda uma sessão plenária dedicada à cerimónia de entrega de prestigiados prémios nacionais de engenharia de estruturas: o Prémio Ferry Borges, promovido pela APEE, a Medalha de Mérito do GPBE e o Prémio Jovens Mestres, promovido pelo GPBE.

Devido à pandemia COVID-19, o Congresso Nacional Reabilitar & Betão Estrutural 2020 foi adiado um ano, de forma a permitir a sua realização presencial no Laboratório Nacional de Engenharia Civil, tendo lugar nos dias 3 a 5 de novembro de 2021. A sua organização teve o apoio do Laboratório Nacional de Engenharia Civil, da Ordem dos Engenheiros e da Ordem dos Arquitectos.

As atas do congresso incluem os artigos correspondentes às 6 palestras principais, da autoria de oradores convidados, apresentadas em sessões plenárias, assim como os artigos correspondentes às 147 comunicações aceites para apresentação oral, como resultado da revisão por parte de pelo menos dois membros da Comissão Científica, de acordo com a sua especialização, apresentadas em 26 sessões paralelas, 7 das quais organizadas como sessões especiais, de forma a abarcar 4 grandes temas: Patologia, Inspeção e Diagnóstico; Materiais e Produtos para Estruturas Duráveis e Sustentáveis; Análise, Modelação e Normalização; Realizações - Obras Novas e de Reabilitação. Adicionalmente, são também incluídas nas atas as 5 comunicações relativas Prémio Jovens Mestres.

Luís Oliveira Santos
Presidente da Comissão Organizadora

Eduardo Júlio
Presidente da Comissão Científica

COMISSÕES

Comissão Organizadora

Luís Oliveira Santos (*Presidente*)
Mário Pimentel (*Vice-Presidente*)
Ana Sofia Louro
Elsa Caetano
João Almeida Fernandes
João André
José Sena Cruz
Luís Machado
Pedro Cabral
Rita Moura
Sandra Neves

Comissão Científica

Eduardo Júlio (*Presidente*)
J. Ramôa Correia (*Vice-Presidente*)
Paulo Fernandes (*Secretário*)
Alexandre Pinto
Alexandre Portugal
Álvaro Cunha
Ângela Nunes
Aníbal Costa
António Abel Henriques
António Baptista Coelho
António Bettencourt Ribeiro
A. Carrasquinho de Freitas
António Correia
António Costa
António Lopes Batista
António M. Baptista
António Perry da Câmara
António Pinho Ramos
António Reis
António Santos Silva
António Tavares de Castro
Arlindo Gonçalves
Armando Rito
Augusto Gomes
Carlos Chastre Rodrigues
Carlos Félix
Carlos Martins
Cristina Barris
David Fernández-Ordoñez
Eduardo Cansado Carvalho
Eduardo Cavaco

Eva Oller Ibars
Fernando Branco
Fernando Stucchi
Francisco Virtuoso
Helena Cruz
Hugo Corres
Hugo Costa
Humberto Varum
Joan Ramon Casas
João Almeida
João Appleton
João Ferreira
João Garcia
João Lanzinha
João Pedro Firmo
João Pires da Fonseca
Joaquim Barros
Joaquim Figueiras
Jónatas Valença
Jorge de Brito
José Aguiar
José Alexandre Bogas
José Câmara
José Campos e Matos
José Lobo de Carvalho
José Manuel Catarino
Jose Romo Martin
José Turmo

Júlio Appleton
Júlio Timmerman
Luciano Jacinto
Luís Câncio Martins
M. Dolores G. Pulido
M. Helena Barros
Manuel Pipa
Miguel Azenha
Miguel Lourenço
Nelson Vila Pouca
Nuno Valentim
Paulo Cachim
Paulo Lourenço
Paulo Maranhã
Paulo Vila Real
Pedro Mendes
Regina Souza
Ricardo do Carmo
Rui Faria
Sandra Nunes
Sérgio Hampshire Santos
Sérgio Lopes
Teresa O. Santos
Túlio Bittencourt
Válter Lúcio
Vasco Moreira Rato
Xu Min

TEMAS

01. Patologia, Inspeção e Diagnóstico

- Enquadramento histórico e arquitetónico em intervenções de reabilitação
- Deterioração dos materiais e das estruturas
- Técnicas de inspeção e diagnóstico
- Ensaios in situ e em laboratório
- Monitorização da integridade estrutural
- Avaliação da vida útil remanescente de estruturas existentes

02. Materiais e Produtos para Estruturas Duráveis e Sustentáveis

- Novos cimentos, adições e adjuvantes
- Caldas e argamassas
- Betões de elevado desempenho e betões reforçados com fibras
- Betões eco-eficientes
- Armaduras em aço de elevado desempenho
- Armaduras em materiais compósitos
- Novos produtos pré-fabricados
- Novos processos construtivos
- Proteção de estruturas
- Reparação de estruturas
- Reforço de estruturas

03. Análise, Modelação e Normalização

- Identificação e caracterização dos sistemas estruturais de construções existentes
- Modelação de ações e da degradação dos materiais
- Modelação do comportamento estrutural
- Critérios e avaliação da segurança
- Avaliação e gestão do risco estrutural e sísmico
- Avaliação da robustez e da resiliência
- Avaliação do risco ambiental
- Normalização e regulamentação

04. Realizações: Obras Novas e de Reabilitação

- Barragens
- Edifícios
- Fundações
- Obras ferroviárias
- Obras portuárias
- Pontes e viadutos
- Reservatórios e silos
- Túneis