

CAMADAS DE BASE E SUB-BASE COM MISTURAS DE AGREGADOS RECICLADOS DE BETÃO TRATADAS COM CIMENTO E ADIÇÃO DE FIBRA DE COCO

João Crucho¹, Luís Picado Santos² e José Neves²

¹CERIS, Instituto Superior Técnico, Universidade de Lisboa, Av. Rovisco Pais, 1049-001 Lisboa, Portugal

email: joao.crucho@tecnico.ulisboa.pt <https://fenix.tecnico.ulisboa.pt/homepage/ist151987>

²CERIS, Departamento de Engenharia Civil, Arquitetura e Georrecursos, Instituto Superior Técnico, Universidade de Lisboa, Av. Rovisco Pais 1, 1049-001 Lisboa, Portugal

Sumário

Neste trabalho foi investigada a aplicação de agregados reciclados (substituindo 100% do agregado natural) e fibra de coco em misturas tratadas com cimento (MTC). Após caracterização dos materiais e formulação das MTC, avaliou-se o comportamento destas misturas em laboratório através de ensaios de compressão simples, tração indireta, flexão e índice de capacidade de carga imediato. Os ensaios indicaram que a MTC com agregado reciclado apresentou um comportamento semelhante à MTC com agregado natural. A introdução de fibra de coco não contribuiu para aumentar as resistências de pico, contudo, assegurou a integridade dos provetes no pós-fendilhamento, indiciando uma maior durabilidade.

Palavras-chave: misturas tratadas com cimento; resíduos de construção e demolição; agregados reciclados; fibra de coco; camadas de base e sub-base.

1 INTRODUÇÃO

As camadas de base e sub-base de infraestruturas de transporte consomem uma grande quantidade de agregados, que na sua maioria são obtidos por britagem de rochas em pedreiras. Isto representa um consumo significativo de recursos naturais não renováveis.

Por outro lado, a renovação e demolição de construções existentes têm proporcionado um aumento do volume de resíduos de construção e demolição (RCD). Os RCD, se processados adequadamente, podem ser uma fonte de agregados reciclados (AR) de qualidade. A eliminação de RCD através de deposição em aterro, para além de representar um problema ambiental, terá também um significativo aumento de custo. Para depositar RCD em aterro, a legislação Portuguesa estabelece uma taxa de gestão de resíduos. Quando foi introduzida, em 2007, esta taxa tinha o valor de 5 € por tonelada (de acordo com o Artigo 58º do Decreto-Lei 178/2006 [1]). Mais recentemente, o Decreto-Lei 102-D/2020 [2], transpondo as Diretivas EU 2018/850 e EU 2018/851, atualiza o valor desta taxa para 22 € por tonelada (em 2022) e indica os valores de 25, 30 e 35 € por tonelada para os anos de 2023, 2024 e 2025, respetivamente. Esta abordagem visa maximizar a reutilização de resíduos, minimizando ou eliminando completamente os volumes a depositar em aterro.

Numa perspetiva de economia circular, o uso de AR para substituir total ou parcialmente os agregados naturais (AN) permitiria reduzir a extração de recursos não renováveis assim como o volume de RCD a conduzir a aterro. A aplicação de AR provenientes de RCD em betão de cimento já foi estudada e validada por vários autores [3–6]. Relativamente a infraestruturas de transporte, também já se estudou a aplicação de AR em camadas granulares não ligadas [7–12] e em misturas tratadas com cimento (MTC) [13–17].

A caracterização do AR, quando comparado com AN, tem revelado menor massa volúmica, maior absorção de água e menor resistência à fragmentação. Estas diferenças podem ser explicadas pela presença de partículas de materiais cerâmicos, e no caso em que o AR é maioritariamente constituído por betão britado, pela presença de argamassa residual ainda aderida ao agregado original. No entanto, no processamento do AR parte desta argamassa

residual será destruída podendo libertar cimento anidro (não hidratado) que quando hidratado pode promover reações de cimentação que aumentem a resistência mecânica da mistura de agregados [7,10]. Assim, os AR obtidos por britagem de betão podem ser particularmente interessantes para aplicação em MTC, pois o contributo deste cimento não hidratado poderá permitir diminuir a quantidade de cimento a adicionar para obter a MTC. Consequentemente, as MTC com AR apresentam uma diminuição da baridade seca máxima e aumento do teor em água ótimo [13–15]. Alguns autores avaliaram o desempenho de MTC com AR em trechos experimentais com ensaios de defletómetro de impacto. Nestes trabalhos verificou-se que deflexões das secções com AR eram iguais ou inferiores às deflexões das secções com AN [16,18], indicando um melhor desempenho com a utilização do AR.

Os materiais ligados permitem explorar mecanismos de reforço como seja a introdução de fibras. Um material com potencial para ser usado no reforço de materiais ligados é a fibra de coco (FC). A FC é um material natural com boas propriedades mecânicas, particularmente de resistência à tração e de extensão na rotura [19,20], sendo obtida a partir da casca de coco, que é um resíduo da indústria alimentar. Este resíduo carece de uma aplicação de larga escala que valorize o material e promova o consumo de grandes volumes atualmente depositados em aterro. Atualmente, alguns trabalhos já avaliaram os efeitos de usar FC em betão de cimento tendo identificado várias vantagens. Os contributos mais importantes foram encontrados na resistência à tração indireta, resistência à flexão, ductilidade e no retardar a propagação de fendilhamento [21–26]. Todavia, a introdução de grandes quantidades de FC pode ter efeitos indesejados, como sejam o aumento do volume de vazios e a diminuição da trabalhabilidade [24,27,28].

Apesar do potencial da FC para reforçar MTC, ainda não se encontram trabalhos na literatura atual. Assim, o presente trabalho pretende dar um contributo para colmatar esta lacuna. Numa perspetiva de maior sustentabilidade e aproveitamento de resíduos, neste trabalho avaliou-se a aplicação de AR (substituindo 100% do AN) e FC em MTC. Após caracterização dos materiais e formulação das MTC, avaliou-se o comportamento destas misturas em laboratório através de ensaios de compressão simples, tração indireta, flexão e índice de capacidade de carga imediato. Neste artigo são apresentados e discutidos os resultados destes ensaios.

2 MATERIAIS E MÉTODOS

Em geral, para a produção de MTC os materiais necessários são agregados, cimento e água. Neste trabalho as variáveis em estudo são o tipo de agregado, natural ou reciclado, e a incorporação de FC para promover um efeito de reforço. Para avaliar melhor os efeitos destas variáveis, o mesmo tipo de cimento e de água (água da rede pública) foram utilizados durante todo o programa experimental. Foram produzidas seis MTC: (1) MTC com AN e 2% de cimento – AN_2c; (2) MTC com AN, 2% de cimento e FC – AN_2c_FC; (3) MTC com AR e 2% de cimento – AR_2c; (4) MTC com AR, 2% de cimento e FC – AR_2c_FC; (5) MTC com AR e 3% de cimento – AR_3c; e (6) MTC com AR, 3% de cimento e FC – AN_3c_FC.

A produção das MTC foi enquadrada pelas especificações Caderno de Encargos Tipo Obra (CETO) da empresa Infraestruturas de Portugal [29], particularmente as rubricas 14.03.5.1.5 – camada de sub-base em agregado britado de granulometria extensa (ABGE), tratado com cimento e 14.03.5.2.1 – camada de base em ABGE, tratado com cimento.

Foram utilizados dois tipos de agregados, um AN e um AR. O AN, adotado como referência, é um ABGE de natureza calcária. O AR foi obtido por processamento de RCD, maioritariamente betão britado, com um britador de mandíbulas. Relativamente à litologia, o agregado original do AR é derivado principalmente de granodiorito. As granulometrias do AN e do AR, conjuntamente com o respetivo fuso granulométrico para ABGE a usar em camadas tratadas com ligantes hidráulicos indicado pelo CETO, são apresentadas na Figura 1. O Quadro 1 apresenta as propriedades do AN e AR.

No CETO é especificado um máximo de 30 para o índice de alongamento e um máximo de 40 para o coeficiente de Los Angeles. Verifica-se que ambos agregados cumprem os requisitos. O AR apresenta valores mais elevados de absorção de água e coeficiente de Los Angeles que podem ser explicados pela argamassa residual aderida ao agregado. Outros trabalhos corroboram estas características do AR [5,11,30]. No CETO também é indicado que quando a quantidade de finos seja superior a 3%, o equivalente de areia deve ser superior a 50, ou se o equivalente de areia for inferior a 50, o azul de metileno deve ser inferior a dois. Nos casos em que a quantidade de finos seja inferior a 3%, estes podem ser considerados não prejudiciais para o comportamento da mistura de agregados. Assim, ambos os agregados cumprem os requisitos do CETO.

O AR pode ser classificado em função da quantidade relativa dos seus constituintes. O Quadro 2 apresenta os constituintes não flutuantes do AR grosso (fração 4/31,5) de acordo com a norma NP EN 933-11 [31].

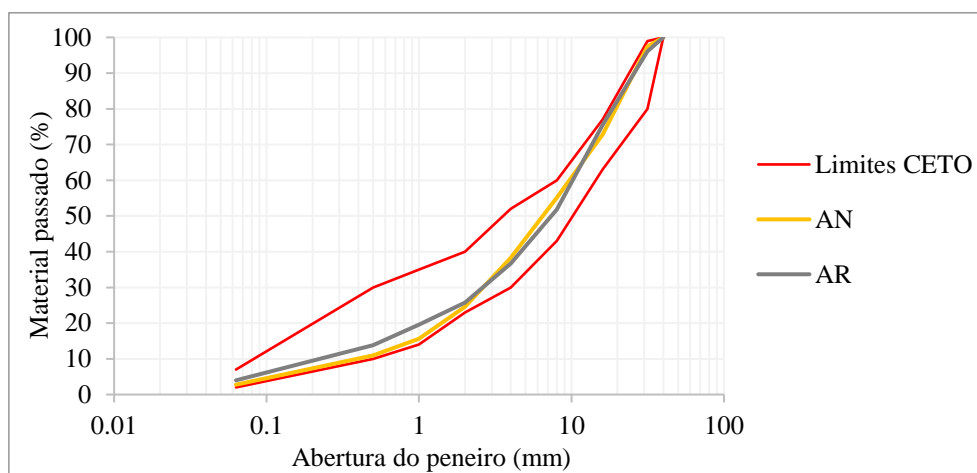


Fig.1. Granulometrias do agregado natural e do agregado reciclado com os limites do CETO

Quadro 1. Propriedades do agregado natural e do agregado reciclado

Propriedade	Norma de ensaio	AN	AR
Fração 0/4 – massa volúmica do material impermeável das partículas (Mg/m^3)	NP EN 1097-6 [32]	2,43	2,43
Fração 0/4 – absorção de água (%)		4,1	6,0
Fração 4/31,5 – massa volúmica do material impermeável das partículas (Mg/m^3)		2,66	2,75
Fração 4/31,5 – absorção de água (%)		2,3	4,9
Coefficiente Los Angeles (LA)	NP EN 1097-2 [33]	33	38
Azul de metileno (g/kg)	NP EN 933-9 [34]	10	7
Equivalente de areia (SE)	NP EN 933-8 [35]	39	70
Índice de forma (SI)	EN 933-4 [36]	12	8
Índice de alongamento (FI)	NP EN 933-3 [37]	11	8
Quantidade de finos (% passados no peneiro 0,063 mm)	NP EN 933-1 [38]	2,8	4,0

Quadro 2. Constituintes do agregado reciclado

Constituintes (NP EN 933-11)	Quantidade (%)
Betão, produtos de betão e argamassa (Rc)	81,03
Agregados não ligados, pedra natural e agregados tratados com ligantes hidráulicos (Ru)	18,34
Elementos de alvenaria (Rb)	0,31
Materiais betuminosos (Ra)	0,31
Vidro (Rg)	0,00
Outros (X)	0,01

De acordo com as quantidades relativas dos constituintes apresentadas no Quadro 2, este AR seria classificado como classe B pela especificação LNEC E 473 [39] que indica uma classificação para AR a utilizar em camadas não ligadas de pavimentos. Segundo a norma americana AASHTO M 319 [40] este AR é classificado como *Reclaimed Concrete Aggregate* (RCA) pois é maioritariamente constituído por betão britado e partículas de agregado natural e cumpre com os limites máximos para os outros constituintes: 5% materiais betuminosos; 5% materiais cerâmicos; 0,1% madeira; 0,1% metais; e 0,1% de gesso e placa de gesso.

O ligante hidráulico utilizado foi um cimento do tipo Portland CEM II/A-L 42,5 R. Intencionalmente, com o objetivo de promover a redução do consumo de recursos naturais, para a produção das MTC foram selecionadas baixas dosagens de cimento (2% e 3%).

A FC foi obtida a partir do processamento de casca de coco, resíduo descartado pela indústria alimentar. A fibra apresenta um comprimento médio de 130 mm, densidade aparente de $1,42 \text{ Mg/m}^3$ e absorção de água de 140%. A Figura 2 apresenta uma amostra da FC utilizada neste trabalho. A quantidade de FC a introduzir, 0,1% em massa de materiais sólidos secos (agregado e cimento), foi selecionada de acordo com a literatura [41]. Devido à elevada absorção, a FC foi humedecida antes de ser adicionada à mistura de agregados, cimento e água.



Fig.2. Amostra de fibra de coco

As MTC foram produzidas em laboratório, utilizando um misturador de tambor (betoneira) de 180 L. Para os ensaios de compressão simples, tração indireta e índice de capacidade de carga imediato, foram compactados provetes cilíndricos (150 mm de diâmetro e 150 mm de altura) com martelo vibrocompactador segundo a NP EN 13286-51 [42]. Para os ensaios de flexão foram compactados provetes prismáticos (400 mm \times 100 mm \times 100 mm) em moldes retangulares, simulando as condições de compactação adotadas para os provetes cilíndricos. Para realizar a compactação, previamente determinou-se a baridade seca máxima e o teor em água ótimo de acordo com a NP EN 13286-1 [43], usando a compactação com martelo vibrocompactador NP EN 13286-4 [44]. Para o AN obteve-se uma baridade seca máxima de $2,19 \text{ Mg/m}^3$ e teor em água ótimo de 4,1%. Para o AR obteve-se uma baridade seca máxima de $1,96 \text{ Mg/m}^3$ e teor em água ótimo de 9,2%. Após a compactação, os provetes foram condicionados na câmara de cura, a 20°C e 95% de humidade relativa.

O comportamento das MTC foi avaliado através de um programa experimental conduzido em laboratório, incluindo os ensaios de compressão simples, tração indireta, flexão e índice de capacidade de carga imediato. Os ensaios de compressão simples foram realizados aos 7 dias, segundo a norma NP EN 13286-41 [45], sob aumento de tensão constante, garantindo que a rotura do provete ocorria entre 30 a 60 s após o início do carregamento. Os ensaios de tração indireta foram realizados aos 7 dias, sob deslocamento constante (50 mm/min) garantindo que o aumento de tensão não excedia 0,2 MPa/s, conforme indicado pela respetiva norma de ensaio NP EN 13286-42 [46]. Como no caso de MTC não existe norma portuguesa (nem europeia) para o ensaio de flexão, então foi adotado o procedimento indicado para provetes de betão de cimento na NP EN 12390-5 [47]. Utilizou-se o método de flexão simples com carregamento a meio-vão, com aplicação de deslocamento constante (1,27 mm/min) e garantindo que o aumento de tensão não excedia 0,05 MPa/s. Os ensaios de flexão foram realizados aos 28 dias. O índice de capacidade de carga imediato foi avaliado seguindo a norma NP EN 13286-47 [48]. O procedimento

é semelhante ao ensaio CBR convencional apenas com as particularidades de a penetração do pistão se iniciar entre 60 a 90 minutos após a preparação dos provetes (sem cura) e não se aplicar qualquer sobrecarga.

3 CARACTERIZAÇÃO DO COMPORTAMENTO MECÂNICO

3.1 Resistências à compressão simples e tração indireta

Os resultados de compressão simples e tração indireta aos 7 dias são apresentados na Figura 3. As barras representam valores médios (média de três provetes) e as marcas de erro representam o respetivo desvio padrão. Todas as MTC apresentaram bons resultados de compressão simples e tração indireta, com valores médios superiores a 5 MPa e 0,35 MPa, respetivamente. Assim, todas as MTC cumprem os requisitos de resistência geralmente exigidos. Atualmente o CETO [29] requer que a resistência à compressão simples aos 28 dias seja superior a 1 MPa. Relativamente à resistência à tração indireta, o CETO também não apresenta requisitos, mas uma especificação anterior da Junta Autónoma de Estradas (como referido em [49]) indica um mínimo de 0,20 MPa aos 7 dias e 0,30 MPa aos 28 dias.

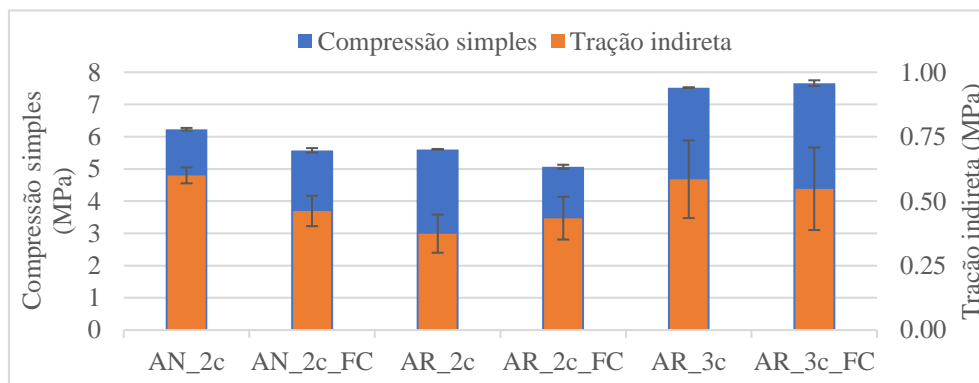


Fig.3. Resistência à compressão simples e tração indireta aos sete dias de idade

A utilização de AR em substituição do AN não comprometeu a resistência da MTC. No caso das MTC com 2% de cimento, verificou-se que a MTC com AR apresentou ligeiramente menor resistência. Comparativamente à MTC com AN, a MTC com AR apresentou variações de -10% e -9% na compressão simples e -38% e -6% na tração indireta, para as MTC sem FC e com FC, respetivamente.

Como seria expectável, no caso da MTC com AR, o aumento da quantidade de cimento, de 2% para 3%, causou um aumento de resistência. A resistência à compressão simples aumentou 34% na MTC sem FC e 51% na MTC com FC. A resistência à tração indireta aumentou 56% na MTC sem FC e 26% na MTC com FC.

A introdução da FC não revelou um efeito claro nas resistências de pico, previsivelmente porque os provetes atingiram a rotura antes de se conseguir mobilizar a contribuição das fibras. Na MTC com AN, a introdução de FC provocou uma diminuição de 11% na compressão simples e 23% na tração indireta. No caso das MTC com AR, a introdução de FC provocou uma variação de -10% e +2% na compressão simples e +16% e -6% na tração indireta, na MTC com 2% e 3% de cimento, respetivamente. De acordo com alguns trabalhos sobre a introdução de FC em betão de cimento, a introdução de fibras pode promover um aumento dos vazios e a respetiva diminuição da densidade, o que por sua vez afetará a resistência do material. Contudo, em todas as MTC a introdução da FC contribuiu muito para a integridade dos provetes no pós-fendilhamento. Na fase após o pico de carga, enquanto os provetes sem FC mostraram tendência a desagregar-se, perder material e a dividir-se em duas partes no caso do ensaio de tração indireta, os provetes com FC mantiveram a sua integridade e a perda de partículas foi mínima.

3.2 Resistência à flexão

Os resultados da resistência à flexão aos 28 dias são apresentados na Figura 4, em que as barras representam os valores médios (resultados de dois provetes) e as marcas de erro representam o desvio padrão. Todas as MTC com 2% de cimento apresentaram valores de resistência à flexão compreendidos entre 0,5 MPa a 1,0 MPa. Nas MTC com 3% de cimento já se verificou valores de resistência à flexão mais elevados. No caso das MTC com AR (em que é possível fazer a comparação direta) o aumento da quantidade em cimento de 2% para 3% representou um aumento na resistência à flexão de 102% na MTC sem FC e 237% na MTC com FC. Este aumento de resistência era expectável, pois a dosagem de 2% de cimento foi consideravelmente baixa e o ensaio de flexão é muito sensível à quantidade de ligante.

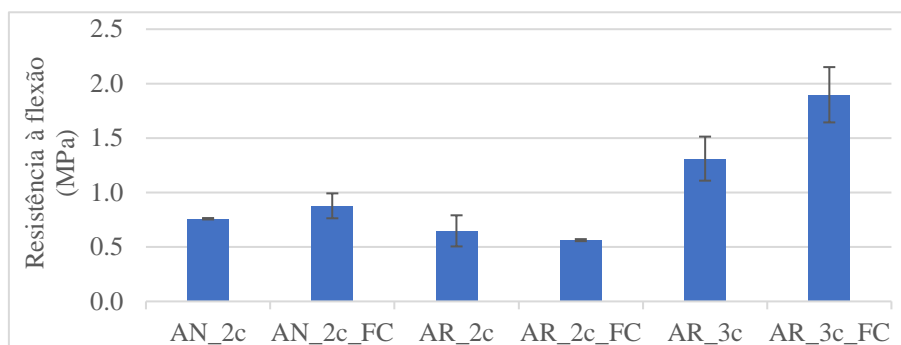


Fig.4. Resistência à flexão aos 28 dias de idade

A introdução de FC causou uma variação na resistência à flexão de +16%, -13% e 45% para a MTC com AN e 2% de cimento, MTC com AR e 2% de cimento e MTC com AR e 3% de cimento, respetivamente. Assim, no caso da resistência à flexão, a FC parece ser mais eficaz se a quantidade de cimento for mais alta, possivelmente por haver melhor ancoragem das fibras e conseqüentemente maior sollicitação das mesmas. Contudo, especialmente para as MTC com 2% de cimento, apesar de a FC apresentar pouca influencia nas resistências de pico, esta proporcionou a integridade e consistência dos provetes no pós-fendilhamento. Este efeito é visualmente perceptível na Figura 5 em que se verifica que a MTC sem FC entra em rotura e o provete divide-se em duas partes, e no caso da MTC com FC, apesar de fendilhar, o provete manteve a sua integridade.



Fig.5. Exemplo de provetes de MTC com AN e 2% cimento, sem FC (esquerda) e com FC (direita), após o ensaio de resistência à flexão

3.3 Índice de capacidade de carga imediato

Os resultados do índice de capacidade de carga imediato são apresentados na Figura 6. Como o ensaio é realizado ao fim de 60 a 90 minutos após a compactação do provete, o aumento de resistência devido à hidratação do cimento será ainda desprezável. Assim, como esperado, a quantidade de cimento não revelou um efeito claro nos resultados

do índice de capacidade de carga imediato. De forma semelhante, a FC também não revelou um efeito claro, pois sem ancoragem proporcionada essencialmente pelo cimento esta poderá ser solicitada apenas de forma marginal.

O índice de capacidade de carga imediato pretende dar uma indicação sobre a possibilidade de tráfego imediato durante a fase construtiva em camadas de pavimento constituídas por MTC. Para este efeito, a norma europeia EN 14227-1 [50] recomenda um índice de capacidade de carga imediato mínimo de 40%. Verifica-se que todas as MTC apresentam valores iguais ou superiores a 150%, o que indica um comportamento adequado. Estes valores, relativamente altos, podem ser explicados pelos constituintes das MTC, particularmente, a boa qualidade dos agregados e granulometria adequada cumprindo os limites da especificação. Possivelmente, as diferenças nos valores de índice de capacidade de carga imediato das MTC estudadas são justificadas por um melhor (ou pior) imbricamento dos agregados em alguns dos provetes. Estes resultados ajudam a comprovar o bom comportamento do AR para aplicação em MTC.

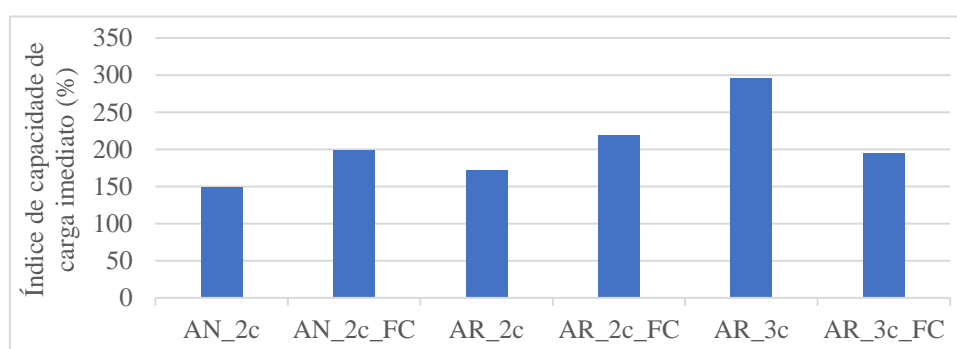


Fig.6. Índice de capacidade de carga imediato

4 CONCLUSÕES

Neste trabalho avaliou-se o comportamento mecânico de misturas tratadas com cimento (MTC) com incorporação de agregado reciclado (AR) proveniente de resíduos de construção e demolição (RCD), maioritariamente betão britado, e fibra de coco (FC) obtida a partir de casca de coco descartada. A construção de MTC, para camadas de sub-base e base de pavimentos, com AR permitirá reduzir a extração de recursos naturais não renováveis enquanto se consome um resíduo consequentemente reduzindo também os volumes em aterro. A casca de coco, atualmente um resíduo da indústria alimentar, pode ser processada para se obter FC, que é uma fibra natural com boas propriedades e potencial para reforçar materiais ligados. Assim, numa perspetiva de economia circular, este trabalho pretende contribuir para a construção de MTC essencialmente utilizando resíduos.

Foi desenvolvido um programa experimental, em laboratório, para avaliar o comportamento mecânico das MTC incorporando os materiais acima mencionados. O comportamento mecânico das MTC foi avaliado com ensaios de resistência à compressão simples, resistência à tração indireta, resistência à flexão e índice de capacidade de carga imediato. O programa experimental permitiu obter as seguintes conclusões:

- Os ensaios revelaram que, não obstante as baixas quantidades de cimento consideradas (2% e 3%), todas as MTC estudadas apresentaram um bom comportamento, cumprindo facilmente os requisitos de resistência mínima habitual estabelecidos em caderno de encargos.
- A utilização de AR em substituição de 100% do AN não comprometeu o comportamento mecânico da MTC. No geral, a MTC com AR apresentou um comportamento razoavelmente semelhante ao da MTC com AN. Sendo de realçar que o AN utilizado neste trabalho foi um ABGE calcário de boa qualidade. Relativamente às propriedades da MTC, comparativamente à MTC com AN, a MTC com AR apresentou menor baridade seca máxima e maior teor em água ótimo. O índice de capacidade de carga imediato também realça o bom comportamento do AR, permitindo concluir positivamente sobre a possibilidade de tráfego imediato durante a fase de construção.

- A introdução de FC proporcionou um efeito de reforço na MTC. Apesar de não contribuir significativamente para aumentos de resistência quando foi usada a quantidade de cimento mais baixa (2% de cimento), a FC contribuiu para aumentar a resistência à flexão quando a quantidade de cimento aumentou (3% de cimento). A FC revelou também a capacidade de assegurar a integridade dos provetes nas condições de pós-fendilhamento, minimizando a perda de partículas e evitando a rotura dos provetes em duas metades. Este contributo indica que a presença de FC pode contribuir significativamente para aumentar a durabilidade de MTC e o seu comportamento em condições pós-fendilhamento.

Futuramente, serão realizados ensaios específicos para se quantificar os contributos da FC na durabilidade de MTC, nomeadamente, ensaios de avaliação da perda de massa pelos métodos de molhagem-secagem e gelo-degelo.

Para concluir sobre a viabilidade de construir MTC com incorporação de FC e o desempenho em serviço sob condições de tráfego real, realizou-se recentemente um trecho experimental. A construção do trecho foi possível com a tecnologia atual, utilizada em agregados naturais, e decorreu como espetável. Futuramente, a capacidade de carga será avaliada periodicamente.

5 AGRADECIMENTOS

Este trabalho foi financiado pela FCT – Fundação para a Ciência e a Tecnologia, I.P. no âmbito do projeto PTDC/ECI-TRA/32244/2017. Os autores desejam agradecer à FCT o financiamento deste trabalho.

Pelas importantes contribuições para este trabalho, os autores desejam agradecer ao Laboratório de Vias de Comunicação e Transportes (LVCT) do Instituto Superior Técnico (IST), ao Laboratório de Geotecnia do IST, à IBERA – Indústria de Betão, S.A. e ao Laboratório de Solos e Pavimentos da Direção de Infraestruturas da Força Aérea Portuguesa.

6 REFERÊNCIAS

1. DRE, Decreto-Lei N. 178/2006, *Diário da República*, 1a série, N. 171 - 5 de setembro de 2006.
2. DRE, Decreto-Lei N. 102-D/2020, *Diário da República*, 1a série, N. 239 - 10 de dezembro de 2020.
3. L. Butler, J. West, S. Tighe, Effect of recycled concrete aggregate properties on mixture proportions of structural concrete, *Transportation Research Record*, 2290 105–114, 2012.
4. J. Bogas, J. Brito, D. Ramos, Freeze-thaw resistance of concrete produced with fine recycled concrete aggregates, *Journal of Cleaner Production*, 115 294–306, 2016.
5. D. Pedro, J. Brito, L. Evangelista, Structural concrete with simultaneous incorporation of fine and coarse recycled concrete aggregates: Mechanical, durability and long-term properties, *Construction and Building Materials*, 154 294–309, 2017.
6. D. Tavakoli, M. Hashempour, A. Heidari, Use of waste materials in concrete: A review, *Pertanika Journal of Science & Technology*, 26(2) 499-522, 2018.
7. M. Arm, Self-cementing properties of crushed demolishing concrete in unbound layers results from triaxial tests and field tests, *Waste Management*, 21 235–239, 2001.
8. A. Freire, J. Neves, A. Roque, I. Martins, M. Antunes, G. Faria, Use of construction and demolition recycled materials (C&DRM) in road pavements validated on experimental test sections, *Proceedings of the WASTES: Solutions, Treatments and Opportunities, 2nd International Conference*, pp. 91–96, Braga, 11-13 September 2013.
9. R. Cardoso, R. Silva, J. Brito, R. Dhir, Use of recycled aggregates from construction and demolition waste in geotechnical applications: A literature review, *Waste Management*, 49 131–145, 2016.
10. J. Gonzalez-Burón, A. Nogués, Study of granular base course with incorporation of recycled concrete aggregates - Argentinas' experience, *Proceedings of the PIARC - 26th World Road Congress*, Abu Dhabi, 6-10 October 2019.

11. A. Freire, J. Neves, A. Roque, I. Martins, M. Antunes, Feasibility study of milled and crushed reclaimed asphalt pavement for application in unbound granular layers, *Road Materials and Pavement Design*, 0629 1500–1520, 2019.
12. S. Pourkhorshidi, C. Sangiorgi, D. Torreggiani, P. Tassinari, Using Recycled Aggregates from Construction and Demolition Waste in Unbound Layers of Pavements, *Sustainability*, 12 1–20, 2020.
13. M. Pasetto, The re-utilisation of discarded building materials in cement-stabilised layers of road and airfield pavements, *Waste Management*, 1 548–566, 2000.
14. A. Behiry, Utilization of cement treated recycled concrete aggregates as base or subbase layer in Egypt, *Ain Shams Engineering Journal*, 4 661–673, 2013.
15. M. Pasetto, N. Baldo, Recycling of waste aggregate in cement bound mixtures for road pavement bases and sub-bases, *Construction and Building Materials*, 108 112–118, 2016.
16. F. Agrela, A. Barbudo, A. Ramírez, J. Ayuso, M. Carvajal, J. Jiménez, Construction of road sections using mixed recycled aggregates treated with cement in Malaga, Spain, *Resources, Conservation and Recycling*, 58 98–106, 2012.
17. D. Stehlík, P. Hyzl, M. Varaus, Waste Building Materials to Roads in Czech Republic. *Applied Mechanics and Materials*, 832, 10–17, 2016.
18. P. Pérez, F. Agrela, R. Herrador, J. Ordoñez, Application of cement-treated recycled materials in the construction of a section of road in Malaga, Spain, *Construction and Building Materials*, 44 593–599, 2013.
19. K. Ghavami, R. Toledo Filho, N. Barbosa, Behaviour of composite soil reinforced with natural fibres, *Cement and Concrete Composites*, 21 39–48, 1999.
20. S. Munawar, K. Umemura, S. Kawai, Characterization of the morphological, physical, and mechanical properties of seven nonwood plant fiber bundles, *Journal of Wood Science*, 53 108–113, 2007.
21. M. Ramli, W. Kwan, N. Abas, Strength and durability of coconut-fiber-reinforced concrete in aggressive environments, *Construction and Building Materials*, 38 554–566, 2013.
22. A. Sekar, G. Kandasamy, Optimization of coconut fiber in coconut shell concrete and its mechanical and bond properties, *Materials (Basel)*, 11 (1726), 2018.
23. M. Ali, A. Liu, H. Sou, N. Chouw, Mechanical and dynamic properties of coconut fibre reinforced concrete, *Construction and Building Materials*, 30 814–825, 2012.
24. M. Ali, N. Chouw, Experimental investigations on coconut-fibre rope tensile strength and pullout from coconut fibre reinforced concrete, *Construction and Building Materials*, 41 681–690, 2013.
25. J. Chen, N. Chouw, Nonlinear flexural behaviour of flax FRP double tube confined coconut fibre reinforced concrete, *Materials and Design*, 93 247–254, 2016.
26. M. Khan, M. Ali, Effect of super plasticizer on the properties of medium strength concrete prepared with coconut fiber, *Construction and Building Materials*, 182 703–715, 2018.
27. S. Gonçalves, *Uso da Fibra de Coco em Betão*, Projeto para obtenção do grau de Mestre em Engenharia Civil, Instituto Superior de Engenharia do Porto, 2016.
28. A. Otunyo, N. Nyecheio, Mechanical Properties and Fracture Behaviour of Coconut Fibre Reinforced Concrete (CFRC), *American Journal of Civil Engineering and Architecture*, 5(5) 208–216, 2017.
29. Estradas de Portugal, *Caderno de Encargos Tipo Obra*, Infraestruturas de Portugal, Almada, 2014.
30. F. Martinho, L. Picado-Santos, S. Capitão, Feasibility assessment of the use of recycled aggregates for asphalt mixtures, *Sustainability*, 10(1737), 2018.
31. IPQ, *NP EN 933-11 - Ensaios das propriedades geométricas dos agregados - Parte 11: Ensaio para classificação dos constituintes de agregados grossos reciclados*, 2011.
32. IPQ, *NP EN 1097-6 - Ensaios das propriedades mecânicas e físicas dos agregados - Parte 6: Determinação da massa volúmica e da absorção de água*, 2016.

33. IPQ, *NP EN 1097-2 - Ensaio das propriedades mecânicas e físicas dos agregados - Parte 2: Métodos para a determinação da resistência à fragmentação*, 2011.
34. IPQ, *NP EN 933-9:2009+A1 - Ensaio das propriedades geométricas dos agregados - Parte 9: Avaliação dos finos - Ensaio do azul de metileno*, 2017.
35. IPQ, *NP EN 933-8:2012+A1 - Ensaio das propriedades geométricas dos agregados - Parte 8: Avaliação dos finos; Ensaio do equivalente de areia*, 2017.
36. CEN, *EN 933-4 - Tests for geometrical properties of aggregates - Part 4: Determination of particle shape - Shape index*, 2008.
37. IPQ, *NP EN 933-3 - Ensaio das propriedades geométricas dos agregados - Parte 3: Determinação da forma das partículas; Índice de achatamento*, 2014.
38. IPQ, *NP EN 933-1 - Ensaio das propriedades geométricas dos agregados - Parte 1: Análise granulométrica; Método da peneiração*, 2014.
39. LNEC, *E 473 - Guia para a utilização de agregados reciclados em camadas não ligadas de pavimentos*, 2009.
40. AASHTO, *M 319-02, Standard specification for reclaimed concrete aggregate for unbound soil-aggregate base course*, 2015.
41. J. Crucho, L. Picado-Santos, J. Neves, Cement-treated pavement layers incorporating construction and demolition waste and coconut fibres: a review, *International Journal of Pavement Engineering*, <https://doi.org/10.1080/10298436.2021.1984475>, 2021.
42. IPQ, *NP EN 13286-51 - Misturas não ligadas e misturas tratadas com ligantes hidráulicos - Parte 51: Método de fabrico de provetes de misturas tratadas com ligantes hidráulicos por compactação com martelo vibrocompactador*, 2012.
43. IPQ, *NP EN 13286-1 - Misturas não ligadas e misturas tratadas com ligantes hidráulicos - Parte 1: Métodos de ensaio para a determinação da baridade e do teor de água - Introdução, requisitos gerais e amostragem*, 2009.
44. IPQ, *NP EN 13286-4 - Misturas não ligadas e misturas tratadas com ligantes hidráulicos - Parte 4: Métodos de ensaio para a determinação da baridade e do teor de água - Martelo vibrocompactador*, 2013.
45. IPQ, *NP EN 13286-41 - Misturas não ligadas e misturas tratadas com ligantes hidráulicos - Parte 41: Método de ensaio para a determinação da resistência à compressão para misturas tratadas com ligantes hidráulicos*, 2011.
46. IPQ, *NP EN 13286-42 - Misturas não ligadas e misturas tratadas com ligantes hidráulicos - Parte 42: Método de ensaio para a determinação da resistência à tracção indirecta para misturas tratadas com ligantes hidráulicos*, 2011.
47. IPQ, *NP EN 12390-5 - Ensaio do betão endurecido - Parte 5: Resistência à flexão de provetes*, 2019.
48. IPQ, *NP EN 13286-47 - Misturas não ligadas e misturas tratadas com ligantes hidráulicos - Parte 47: Método de ensaio para a determinação do Índice Californiano de Capacidade de Carga, do Índice de Capacidade de Carga Imediato e da expansibilidade linear*, 2014.
49. F. Branco, P. Pereira, L. Picado-Santos, *Pavimentos Rodoviários*, Almedina, Coimbra, 2016.
50. CEN, *EN 14227-1:2013, Hydraulically bound mixtures - Specifications - Part 1: Cement bound granular mixtures*, 2013.