2020 ENTAC
XVIII Encontro Nacional de Tecnologia do Ambiente Construído
Futuro da Tecnologia do Ambiente Construído e os Desafios Globais
Porto Alegre, 4 a 6 de novembro de 2020

EFEITO DA ENERGIA DE COMPACTAÇÃO NA RESISTÊNCIA MECÂNICA DE CONCRETOS SECOS COM ADIÇÃO DE CINZA PESADA E USO DE ADITIVO PLASTIFICANTE[1]

MOURA, Alan (1); NOBRE, Cristina (2); CABRAL, Antônio (3); BABADOPULOS, Lucas (4)

(1) Universidade Federal do Ceará, sousaalan834@gmail.com
(2) Universidade Federal do Ceará, cristinapereiranobre@gmail.com
(3) Universidade Federal do Ceará, eduardo.cabral@ufc.br
(4) Universidade Federal do Ceará, babadopulos@ufc.br

RESUMO

A utilização de concreto seco na confecção de peças pré-fabricadas tem ganhado relevância no mercado da construção civil, evidenciando a necessidade de pesquisas sobre este tema. Nesse sentido, este artigo pretende analisar o efeito da energia de compactação na resistência à compressão de concretos secos, utilizando como variáveis de entrada a variação da energia de compactação aplicada na moldagem (10, 20 ou 30 golpes), a substituição ou não de 30% da areia natural por cinza de fundo e a utilização ou não de aditivo plastificante. Os corpos de prova foram moldados por meio de compactação utilizando um soquete metálico tipo Proctor. Os resultados obtidos indicam que a compactação tem efeito significativo sobre a resistência à compressão das peças produzidas, evidenciando a necessidade da utilização de equipamentos que garantam uma moldagem eficiente a fim de assegurar a qualidade e durabilidade das peças produzidas. A presença da cinza de fundo mostrou-se eficiente conduzindo a maiores resultados de resistência para uma mesma energia aplicada. O aditivo plastificante também se mostrou eficiente facilitando a compactação e conduzindo a resultados de resistência satisfatórios mesmo para a menor energia aplicada. A ação conjunta da cinza e do aditivo conduziu aos melhores resultados obtidos.

Palavras-chave: *Concreto seco, Cinza de fundo, Aditivo plastificante, Compactação, Resistência à compressão.*

ABSTRACT

The use of no-slump concrete in the manufacture of precast pieces has gained relevance in the civil construction market. The lack of specific standardization for no-slump concrete ends up hampering its technological control. In this sense, this article aims to analyze the effect of compaction energy on the compressive strength of no-slump concretes, using as parameters the compaction energy variation applied in the molding (10, 20 or 30 blows), a 30% replacement of natural sand by bottom ash and the use or not of a plasticizer admixture. The specimens were molded through compaction using a Proctor metallic compaction hammer.

[1] MOURA, Alan; NOBRE, Cristina; CABRAL, Antônio; BABADOPULOS, Lucas. Efeito da energia de compactação na resistência mecânica de concretos secos com adição de cinza pesada e uso de aditivo plastificante. In: ENCONTRO NACIONAL DE TECNOLOGIA DO AMBIENTE CONSTRUÍDO, 18., 2020, Porto Alegre. **Anais**... Porto Alegre: ANTAC, 2020.

The results obtained indicate that compaction has a significant effect on the compressive strength of the pieces produced, highlighting the need to use equipment that guarantees efficient molding in order to guarantee the quality and durability of the pieces produced. The presence of bottom ash proved to be efficient, leading to greater resistance results for the same applied energy. The plasticizer admixture also proved to be efficient, facilitating compaction and leading to satisfactory resistance results even for the lowest applied energy. The joint action of ash and the admixture led to the best results obtained.

***Keywords**: No-slump concrete, Bottom ash, Plasticizer admixture, Compaction, Compressive strength.*

1 INTRODUÇÃO

Concreto seco pode ser definido como concreto com consistência correspondente a um abatimento menor ou igual a 6 mm (1/4 polegada) (KOSMATKA; KERKHOFF; PANARESE, 2002) ou entre 0 e 25 mm, segundo o ACI (2002). Esse tipo de concreto tem sido utilizado na fabricação de peças pré-moldadas, como tubos de esgoto, placas de concreto, blocos de pavimentação, blocos de alvenaria, telhas e meios-fios (HÜSKEN; BROUWERS, 2011). São características deste tipo de concreto: o baixo teor de umidade, a consistência quase seca e a reduzida coesão (MARCHIONI et al., 2012).

Os concretos secos apresentam grandes diferenças de comportamento quando comparados aos concretos plásticos. Entre essas diferenças, Frasson Junior (2000) destaca a forma com que o ar é aprisionado às misturas, a maneira como se expressa a relação água/materiais secos, denominado de teor de umidade, os processos utilizados na produção das peças, entre outras. Em geral, o teor de umidade dos concretos secos se encontra entre 6% e 8% (para concretos plásticos varia entre 7,5% a 11,5%) (FRASSON JUNIOR, 2000).

A utilização deste tipo de concreto nas indústrias de pré-moldados e de concretos compactados deve ser associada ao uso de máquinas vibrocompressoras e rolos compactadores para expulsão do ar incorporado na mistura e garantir que as peças produzidas atinjam as propriedades mecânicas desejadas (REZENDE et al., 2012). Marchioni et al. (2012) destaca ainda que a eficiência da compactação na etapa de vibroprensagem, medida pela capacidade de eliminação de vazios, está diretamente relacionada à coesão da mistura no estado fresco e às propriedades no estado endurecido, pois a redução da porosidade propicia um aumento na resistência mecânica e uma redução da permeabilidade das peças produzidas, garantindo melhor desempenho e maior durabilidade.

A capacidade de escoamento da mistura para o interior das fôrmas e o atrito entre as partículas são fatores fundamentais para a facilidade de compactação da mistura (MARCHIONI et al., 2012). Dessa forma, fatores como o tamanho e formato dos grãos e o teor de umidade da mistura tendem a serem fatores fundamentais para a eficiência de compactação. Aditivos podem ser utilizados com o intuito de permitir uma melhor lubrificação entre as partículas, melhorando o deslizamento entre os grãos, facilitando assim, a compactação da mistura (Hüsken e Brouwers, 2011).

Diversas pesquisam sugerem a viabilidade do uso de cinzas de carvão mineral em concretos, entretanto poucas pesquisas têm sido desenvolvidas com sua aplicação em concretos secos. Dentre essas cinzas tem-se a cinza leve (ou volante), que tem sido alvo de diversas pesquisas e aplicações em concretos e argamassas como substituição de cimento devido à sua ação pozolânica, e a cinza pesada (ou de

fundo), que tem sido utilizada como agregado miúdo (SINGH; SIDDIQUE, 2015).

Quanto ao concreto seco, a depender das características de forma e de granulometria dos materiais envolvidos, a substituição parcial de areia natural por cinza de fundo pode permitir se obter uma composição granulométrica melhor distribuída, com maior preenchimento de vazios. Contudo isso pode gerar um aumento do atrito entre as partículas e diminuir a trabalhabilidade desses concretos, também em função da maior absorção dessas cinzas (Muthusamy et al., 2018; Singh e Siddique, 2015 e Hamzah et al., 2015). Há também relatos positivos na trabalhabilidade do concreto, justificado devido ao formato esférico da cinza em comparação com a areia utilizada, o que facilita o deslizamento entre as partículas (Bai e Basheer, 2005). Dessa forma, o emprego de cinza de fundo em concreto seco requer atenção, pois pode provocar alterações na trabalhabilidade, sendo necessários ajustes no teor de umidade da mistura.

As metodologias recomendadas em normas para a moldagem de corpos-de-prova de concreto seco são praticamente inexistentes, visto que a NBR 5738 (ABNT, 2015) é aplicável apenas para concretos plásticos, de abatimento entre 60mm e 250mm, sendo ineficiente para concretos secos (verificado também em testes iniciais realizados neste estudo) por não garantir uma adequada compactação da mistura, conduzindo a resultados muito baixos de resistência mecânica, incompatíveis com o campo. Sengün et al. (2019) destaca as limitações de metodologias de moldagem em laboratório que simulem as condições de compactação de CCR em campo. Devido a tais limitações, o controle tecnológico dessas peças acaba sendo ineficiente ou mesmo inexistente, propiciando a execução de peças com baixos desempenho e durabilidade. Diante do exposto, o presente artigo objetiva analisar o efeito da energia de compactação do concreto seco em sua resistência à compressão (aos 7 e 28 dias), variando a energia de compactação aplicada na moldagem, a substituição parcial de areia natural por cinza de fundo oriunda da usina termelétrica do Pécem e a incluindo ainda a utilização de aditivo plastificante.

2 MATERIAIS E MÉTODOS

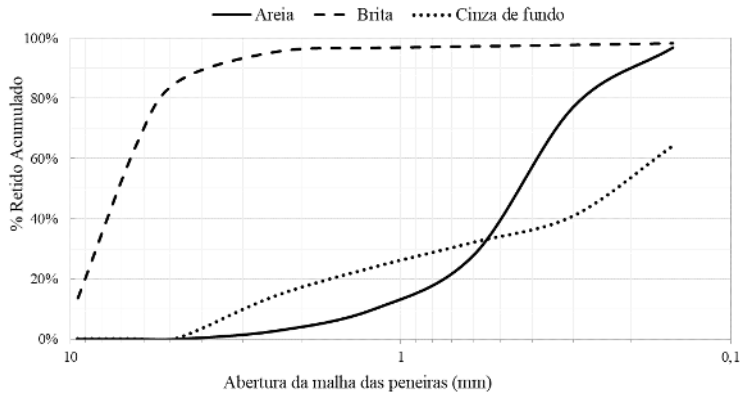
Os agregados naturais empregados nesta pesquisa são areia lavada de granulometria grossa e brita granítica (pedrisco). A cinza de fundo (de granulometria inferior a 4,75 mm) utilizada foi proveniente do módulo I da Usina Termelétrica do Pecém (UTP). O cimento utilizado foi o do tipo CP V (cedido pela fabricante Apodi). A água de amassamento utilizada na mistura foi oriunda da rede de abastecimento local, sendo potável. O aditivo plastificante utilizado foi o Murasan BWA 16 (fabricado pela MC-Bauchemie), indicado para concretos secos por atuar facilitando a compactação e melhorando o desempenho e durabilidade. A Tabela 1 e a Figura 1 a seguir apresentam dados de caracterização dos materiais utilizados.

Tabela 1 – Caracterização básica dos materiais utilizados na pesquisa

Material	Massa específica (g/cm³)	Módulo de finura (mm)	Dimensão máxima característica (mm)	Absorção (%)
Cimento	3,11	-	-	-
Areia	2,64	2,15	2,36	0,60
Cinza de fundo	2,31	1,75	4,75	-
Brita	2,65	5,84	12,5	0,40

Fonte: Autor (2020)

Figura 1 – Composição granulométrica dos agregados utilizados



Fonte: Autor (2020)

A dosagem do traço de referência (notado aqui como "R") utilizado na pesquisa foi feita de forma experimental, seguindo as recomendações da literatura, otimizando traços comumente utilizados por concreteiras na confecção de meios-fios, guias e sarjetas com resistências características à compressão (f_{ck}) mínimas de 15 MPa aos 28 dias. O traço foi ajustado em laboratório até atingir um desempenho satisfatório quanto ao aspecto visual, abatimento, coesão e acabamento superficial. A partir do traço de referência, obteve-se mais três traços: um com substituição de 30%, em volume, da areia por cinza de fundo (notado aqui como "C"), um com a utilização de aditivo plastificante no teor de 1% sobre a massa de cimento (notado aqui como "P") e o último uma ação conjunta de substituição parcial de areia por cinza e uso do aditivo nos teores de 30% e 1%, respectivamente (notado aqui como "C+P"). Devido aos grãos mais finos da cinza em comparação a areia (Figura 1), os traços com cinza (C e C+P) apresentaram aspecto mais seco e foi necessário elevar seus teores de umidade de 8% para 9% para manter a trabalhabilidade e aspecto visual.

Um quadro resumo dos traços utilizados na pesquisa consta na Tabela 2.

Tabela 2 – Traços utilizados na pesquisa

Traço	Cimento (kg/m³)	Areia (kg/m³)	Cinza (kg/m³)	Brita (kg/m³)	Água (kg/m³)	Aditivo (kg/m³)	Teor de umidade (%)
R	280	1200	-	630	168	-	8,0
C	280	840	315	630	186	-	9,0
P	280	1200	-	630	168	2,8	8,0
C+P	280	840	315	630	186	2,8	9,0

Fonte: Autor (2020)

A mistura do concreto seco foi realizada em uma betoneira de mistura por tombo disponível no laboratório. A mistura dos traços de referência (traço "R") (Figura 2a) e com plastificante (traço "P") resultaram em um concreto com aspecto visual satisfatório. Entretanto, a utilização da betoneira de tombo se mostrou ineficiente na mistura dos traços com cinza (traços "C" e "C+P"), tendo dificuldades na homogeneização do material, havendo formação de grumos, principalmente no traço sem o aditivo (traço "C") onde esse comportamento ocorreu de forma acentuada (Figura 2b).

Figura 2 – Aspecto dos traços. (a) Traço de referência. (b) Traço com cinza

(a)  (b) 

Fonte: Autor (2020)

A moldagem dos CPs foi feita utilizando fôrmas metálicas com 10 cm de diâmetro e 20 cm de altura. Para a compactação, foi utilizado um soquete, conforme estabelecido na NBR 7182 (ABNT, 2016), utilizada comumente para a compactação de amostras de materiais granulares (tipicamente solos). O soquete usado tem massa de 4 536 g e altura de queda de 45,7 cm. A moldagem se deu em 4 camadas de aproximadamente 5 cm cada, sendo que, para cada traço, variou-se a quantidade de golpes aplicados em cada uma das 4 camadas (10, 20 ou 30 golpes), para avaliar a influência da energia aplicada nos resultados obtidos. Para cada um dos quatro traços, das duas idades (7 e 28 dias) e das três energias foram moldados 3 CPs para serem rompidos. As Figuras 3a e 3b apresentam os procedimentos de moldagem.

Figura 3 – Moldagem. (a) Enchimento das fôrmas. (b) Aplicação dos golpes

(a)  (b) 

Fonte: Autor (2020)

Embora o concreto seco permitisse a desforma imediata dos CPs a partir da utilização de fôrmas bipartidas, nessa pesquisa a desforma foi feita após 24 horas, pois havia a disponibilidade das fôrmas e não havia necessidade de desforma imediata. Após a desforma, os CPs foram colocados em condição ambiente até a idade em que seriam ensaiados à compressão axial, conforme a NBR 5739 (ABNT, 2018). Essa condição foi escolhida por ser semelhante à que ocorre em meios fios extrudados em campo, onde, em geral, não são feitos procedimentos de cura do concreto.

Nas idades de 7 e 28 dias, foram ensaiados à compressão axial 03 CPs para cada idade, traço e energia aplicada. Para a análise dos resultados foi considerado apenas o maior dos 3 valores da amostra, procedimento semelhante ao indicado

pela NBR 12655 (ABNT, 2018) para o controle tecnológico de um lote de concreto com amostragem total. Essa forma de análise foi adotada devido a variabilidade observada nas condições de moldagem, sendo adotado apenas o CP com moldagem mais eficiente que apresentou melhor resultado. Em geral, a ruptura dos CPs ocorreu de forma coerente com o ensaio de compressão axial, formando fissuras verticais na lateral do CP e cones nas bases, indicando eficiência na moldagem dos CPs pelo método proposto. A Figura 4 ilustra a ruptura padrão observada nos CPs.

Figura 4 – Ruptura padrão dos CPs moldados utilizando o soquete

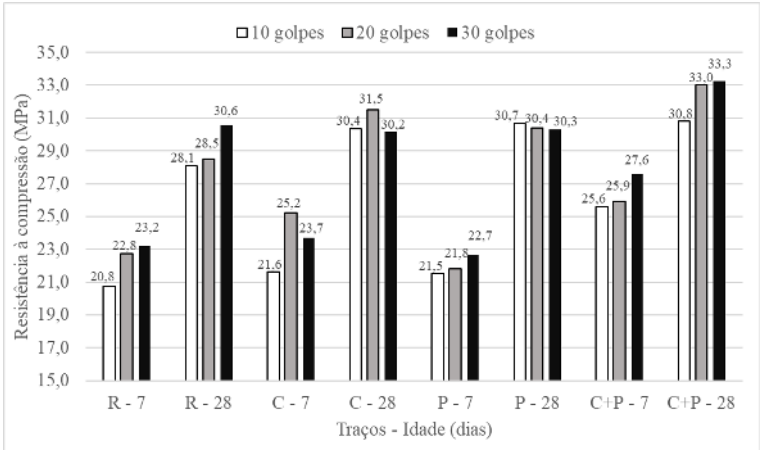


Fonte: Autor (2020)

3 RESULTADOS

A Figura 5 apresenta os resultados obtidos de resistência à compressão para cada um dos quatro traços de concreto estudados, nas idades de 7 e 28 dias e para cada quantidade de golpes aplicados.

Figura 5 – Resultados de resistência à compressão aos 7 e 28 dias

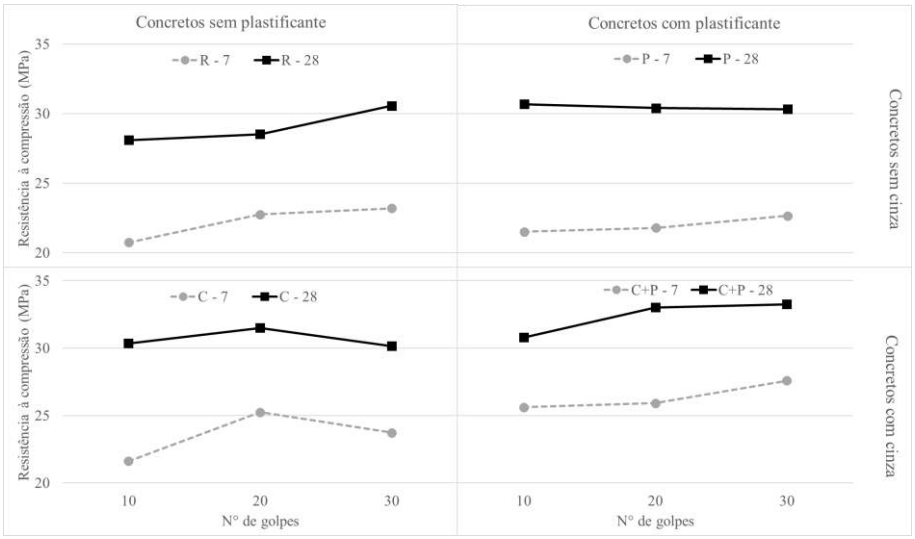


Fonte: Autor (2020)

Os resultados apresentados na Figura 5 mostram que, para todos os traços, foi possível obter valores de resistências superiores aos 15 MPa (inclusive aos 7 dias), valor de f_{ck} mínimo usualmente exigido por normas para meios-fios, guias e sarjetas. Isto não teria sido conseguido casos os CPs fossem moldados conforme os procedimentos da NBR 5738, que se confirmou inadequado para o concreto seco. Além disso, é possível constatar que a energia de compactação aplicada na moldagem aparenta ter influência significativa (pode representar incremento de até cerca de 10%) nos

resultados de resistência obtidos. A Figura 6 apresenta um gráfico com os resultados agrupados por traço.

Figura 6 – Resultados de resistência à compressão agrupados por traço



Fonte: Autor (2020)

Analisando a Figura 6 é possível notar que os traços C e C+P apresentam maiores resistências à compressão para uma mesma quantidade de golpes em comparação que os obtidos pelos traços R e P. Isso ocorreu possivelmente devido à maior compacidade da mistura com o uso da cinza, preenchendo melhor os vazios. O traço P não apresentou, nas duas idades, variação nos valores de resistência quando se muda o número de golpes, indicando que a energia empregada não influenciou na resistência obtida. Esse efeito sugere uma facilitação na compactação, garantindo elevadas resistências mesmo para menores energias aplicadas e indicando que a mistura chegou em sua compactação limite, onde o aumento da energia aplicada não gera aumento na resistência. Além disso, também é possível notar que, em geral, há uma tendência de crescimento da resistência com o aumento da quantidade de golpes aplicados (maior energia de compactação) e que a partir de certo ponto o aumento da energia passa a não contribuir para o aumento da resistência, havendo uma tendência de estabilização em torno de determinado valor. Entretanto, são necessários mais estudos para compreender melhor esse comportamento.

4 CONCLUSÕES

Os resultados obtidos indicam que a energia de compactação aplicada na moldagem influencia os resultados de resistência à compressão, evidenciando a importância do uso de equipamentos de vibrocompressão eficientes na confecção de peças de concreto seco a fim de que se atinjam resultados satisfatórios de desempenho e durabilidade. O método de moldagem de corpos de prova utilizado nessa pesquisa se mostrou viável, conduzindo a resultados satisfatórios de resistências à compressão, servindo assim de base para controle tecnológico de concreto seco em laboratórios ou mesmo em pesquisas futuras na área de concreto seco.

A substituição parcial de areia natural por cinza pesada e o uso de aditivo plastificante se mostraram tecnicamente viáveis. O uso da cinza conduziu a maiores resultados de resistência à compressão. Entretanto, cabe destacar a necessidade de

eventuais ajustes no teor de umidade da mistura, pois a presença da cinza pode modificar a trabalhabilidade da mistura, prejudicando sua compactação. Já o uso do aditivo agiu lubrificando as partículas da mistura e facilitando sua compactação, permitindo assim, obter resultados satisfatórios de resistência à compressão mesmo para os mais baixos níveis de energia de compactação aplicados.

REFERÊNCIAS

AMERICAN CONCRETE INSTITUTE. ACI 211.3: **Guide for selecting proportions for no-slump concrete.** Farmington Hills (MI): American Concrete Institute, 2002.

ABNT ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS**. NBR 5738**: Concreto - Procedimento para moldagem e cura de corpos de prova. Rio de Janeiro, 2015.

_____. **NBR 5739**: Concreto - Ensaio de compressão de corpos de prova cilíndricos. Rio de Janeiro, 2018.

_____. **NBR 7182**: Solo - Ensaio de compactação. Rio de Janeiro, 2016.

_____. **NBR 12655**: Concreto de cimento Portland - Preparo, controle, recebimento e aceitação – Procedimento. Rio de Janeiro, 2015.

BAI, Y.; DARCY, F.; BASHEER, P. A. M. **Strength and drying shrinkage properties of concrete containing furnace bottom ash as fine aggregate.** Constr. Build. Mater. v. 19, p. 691–697, 2005.

FRASSON JUNIOR, A. **Proposta de metodologia de dosagem e controle do processo produtivo de blocos de concreto para alvenaria estrutural.** Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil). Universidade Federal de santa Catarina (UFSC). Florianópolis, SC, Brasil, 2000.

HAMZAH, A. F.; NORWATI, J.; RAMADHANSYAH, P. J.; MOHD FADZIL, A.; NORUL ERNIDA, Z. A. **Fresh characteristic and mechanical compressive strength development of self-compacting concrete integrating coal bottom ash as partial fine aggregates replacement.** International Journal of Engineering & Technology IJET-IJENS, 15(4): p. 61-67, 2015.

HÜSKEN, G.; BROUWERS, H. J. H. **On the early-age behavior of zero-slump concrete.** Cement and Concrete Research, v. 42, n. 3, p. 501–510, 2012. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.cemconres.2011.11.007>.

KOSMATKA, S. H.; KERKHOFF, B.; PANARESE, W. C. **Design and Control of Concrete Mixtures.** EB001, 14th edition, Portland Cement Association, Skokie, Illinois, USA, 2002, 358 pages.

MUTHUSAMY, K.; RASID, M. H.; MAT YAHAYA, F.; SULAIMAN, M. A.; SYED MOHSIN, S. M.; TUKIMAT, N. N.; OMAR, R.; CHIN, S. C. **Compressive strength performance of OPS lightweight aggregate concrete containing coal bottom ash as partial fine aggregate replacement.** IOP Conf. Ser Mater. Sci. Eng. 342, 2018.

MARCHIONI, M. L..; LYRA, J.; PILEGGI, R.; OLIVEIRA, C. **Compaction Test Method for Dry Concrete.** 10th International Conference on Concrete Block Paving Shanghai, Peoples Republic of China, November 24-26, 2012.

REZENDE, M. L. S.; NASCIMENTO, J. W. B.; NEVES, G. A.; SILVA, F. L. H.; LEAL, A. F.; FERREIRA, H. C. **Uso de metacaulim em concreto seco: uma abordagem por superfície de resposta.** Ambiente Construído, Porto Alegre, v. 12, n. 3, p. 135–146, 2012.

SENGÜN, E.; ALAM, B.; SHABANI, R.; YAMAN, I. O. **The effects of compaction methods and mix parameters on the properties of roller compacted concrete mixtures.** Constr. Build. Mater. v. 228, 2019.

SINGH, S.; RANSINCHUNG, G. D. R. N.; MONU, K.; KUMAR, P. **Laboratory investigation of RAP aggregates for dry lean concrete mixes.** Constr. Build. Mater. v. 166, p. 808–816, 2018.