CONDIÇÕES ÓTIMAS PARA A INCORPORAÇÃO DE RESÍDUO DE FRESADO ASFÁLTICO EM CONCRETO DE ALTA RESISTÊNCIA VIA PLANEJAMENTO FATORIAL

João Victor Rodrigues Martins¹, Bruno Guzzo da Silva², Ana Elisabete Paganelli Guimarães de Ávila Jacintho³

¹ Mestre em Sistemas de Infraestrutura Urbana da Pontifícia Universidade Católica de Campinas (PUCAMP), Campinas-SP, Brasil.

E-mail: joaovictorrmartins@hotmail.com

² Professor Doutor da Universidade Federal do ABC (UFABC), CCNH, Santo André-SP, Brasil.

³ Professora Doutora da PUCAMP, Centro de Ciências Exatas, Ambientais e de Tecnologia, Campinas-SP, Brasil.

Recebido em: 04/10/2019 – Aprovado em: 30/11/2019 – Publicado em: 15/12/2019
DOI: 10.18677/EnciBio_2019B11

RESUMO

Com o advento do crescimento urbano e o esgotamento de recursos naturais, torna-se necessária uma maior atenção às ações que visam diminuir o impacto ambiental causado pela indústria da construção civil. Assim, realizar estudos que visam o desenvolvimento de construções mais sustentáveis é fundamental para diminuir o uso de insumos, além de definir um destino correto para os resíduos gerados na construção civil. Neste contexto, o presente trabalho teve por objetivo investigar o uso de resíduo de fresado asfáltico em concretos de alta resistência, como substituto aos agregados naturais (miúdo e graúdo). Para determinar as condições ótimas para a incorporação deste resíduo, um Delineamento Composto Central Rotacional com 11 ensaios foi utilizado. A qualidade do concreto foi analisada por testes de resistência à compressão axial. Os resultados indicaram um traço otimizado, em relação a máxima incorporação do resíduo (7,5% de substituição na fase graúda e 22,5% na fase miúda), com uma resistência à compressão média (28 dias) de 50,85 MPa, sendo apenas 3,71% inferior ao traço referência (52,81 MPa). Dessa forma, estes resultados demonstraram a viabilidade técnica em inserir o resíduo de fresado asfáltico em substituição parcial aos agregados naturais para concretos estruturais de alta resistência. Ademais, os resultados deste trabalho mostraram a eficiência na utilização da metodologia do planejamento experimental fatorial na área da construção civil.

PALAVRAS-CHAVE: concreto, planejamento fatorial, resíduo de fresado asfáltico.

OPTIMUM CONDITIONS FOR THE INCORPORATION OF RECLAIMED ASPHALT PAVEMENT IN HIGH-STRENGTH CONCRETE USING FACTORIAL DESIGN

ABSTRACT

Actions aimed at reducing the environmental impact caused by the construction industry are essential in a World with decreasing natural resources and high urban growth rate. The design of sustainable buildings is fundamental to reduce the use of raw materials and to set the correct destination of waste generated in construction. In this context, the objective of this work was to investigate the potential use of reclaimed asphalt pavement (RAP) instead of natural aggregates in high strength concrete. A Central Composite Rotatable Design with 11 experiments was used to establish the optimum conditions to incorporate reclaimed asphalt pavement in concrete. Mechanical properties were analyzed by axial compressive strength tests. Optimal conditions related to the maximum incorporation of residue (7.5% of substitution of large aggregate and 22.5% of fine aggregate) were achieved with an axial compressive strength (28 days) of 50.85 MPa, only 3.71% lower than the reference concrete (52.81 MPa). Therefore, the results demonstrate the technical feasibility replacing part of natural aggregates for reclaimed asphalt pavement in high strength concrete. In addition, the results of this work showed the efficiency on use the factorial design to determine the optimum conditions for the incorporation of reclaimed asphalt pavement in high strength concrete.

KEYWORDS: concrete, factorial design, reclaimed asphalt pavement.

INTRODUÇÃO

Com o advento do crescimento urbano e o esgotamento de recursos naturais, torna-se necessária uma maior atenção às ações que visam diminuir o impacto ambiental causado pela sociedade moderna. Em todo o mundo, o forte processo de urbanização e o crescimento das demandas de consumo de bens materiais tem aumentado consideravelmente a produção de resíduos sólidos urbanos (RSU). No caso do Brasil, em termos percentuais, o país tem apresentado um crescimento da geração *per capita* de RSU superior ao crescimento populacional, o que gera uma grande preocupação quanto à disposição correta destes materiais (CAMPOS, 2012; GIACCOM-RIBEIRO; MENDES, 2018).

No cenário da construção civil, a questão do impacto ambiental também é preocupante, já que este setor se destaca pela elevada extração de recursos naturais para a produção de insumos e pela geração de resíduos a níveis alarmantes. No Brasil, os chamados resíduos de construção e demolição (RCD) constituem uma importante parcela do RSU. Assim, realizar estudos que visam o desenvolvimento de construções mais sustentáveis é fundamental para diminuir o uso de insumos naturais, além de definir um destino correto para o RCD. Diversos estudos apontam que o concreto pode ser um destino viável para a inserção destes resíduos, que anteriormente seriam descartados em lixões e aterros. Majoritariamente estes materiais podem ser inseridos em substituição aos agregados naturais por sua característica inerte. É importante ressaltar que o conhecimento técnico do comportamento do concreto com agregados reciclados não está bem estabelecido, sendo essa uma lacuna do conhecimento, especialmente se considerado o uso em elementos estruturais (BRASILEIRO; MATOS, 2015; JACINTHO, 2019).

Dentre os resíduos gerados pela indústria da construção civil tem-se o fresado asfáltico, do inglês *Reclaimed Asphalt Pavement* (RAP), que é o principal

resíduo gerado em serviços de pavimentação, sendo obtido através da fresagem de revestimentos asfálticos deteriorados (ROCHA SEGUNDO et al., 2016). Segundo Thomas et al. (2018), a incorporação deste resíduo em concretos, como substituto parcial aos agregados naturais, é uma maneira alternativa de destiná-lo corretamente.

Para garantir o reuso adequado dos resíduos da construção civil, sem comprometer a segurança do produto, é fundamental utilizar metodologias científicas que permitam investigar o impacto destes resíduos na qualidade do concreto. Uma ferramenta que pode ser utilizada é a metodologia do planejamento fatorial de experimentos (*Design of Experiments* - DOE). Baseada nos fundamentos estatísticos, esta metodologia é uma ferramenta de grande utilidade para conhecer as condições otimizadas da incorporação dos resíduos ou simplesmente para investigar os efeitos que o uso do resíduo tem na qualidade do concreto. Esta metodologia fornece informações seguras sobre o processo, minimizando o empirismo que envolve técnicas de tentativa e erro, sendo que há vantagens incomparáveis quanto ao número de ensaios e qualidade na informação (RODRIGUES; IEMMA, 2014).

Na área da construção civil o planejamento fatorial foi utilizado, por exemplo, por Souza et al. (2018) para analisar o comportamento do concreto sob altas temperaturas. Além disso, diversos trabalhos (SHI et al., 2015; PARGHI; ALAM, 2016; KRISHNAN; PURUSHOTHAMAN, 2017; KABAGIRE; YAHIA, 2017; MENG et al., 2018) relataram o uso promissor desta ferramenta na indústria da construção civil.

Com base no que foi exposto anteriormente, neste trabalho a metodologia do planejamento fatorial de experimentos foi utilizada para avaliar o uso de resíduo de fresado asfáltico em substituição parcial aos agregados naturais (fases graúda e miúda) em concretos estruturais de alta resistência.

MATERIAL E MÉTODOS

Produção do concreto

Para a produção dos traços (referência e com resíduo), os seguintes materiais foram utilizados: cimento Portland (CP II E-32); água, proveniente do sistema de abastecimento da cidade de Campinas-SP; aditivo superplastificante de terceira geração a base de policarboxilato (ADVA CAST 525); agregado graúdo natural, originário do britamento de rocha basáltica de jazida localizada na cidade de Pedreira-SP; e agregado miúdo natural, originário da cidade de Roseira-SP. Para investigar o uso de resíduo de fresado asfáltico em substituição parcial aos agregados naturais (fases graúda e miúda), foram utilizados os resíduos oriundos da fresagem asfáltica de pavimento rodoviário da Rodovia 332, km 132, na cidade de Paulínia-SP. O material foi britado em britador do tipo mandíbula e peneirado para que a faixa granulométrica se encaixasse no perfil semelhante aos agregados naturais.

Os agregados naturais (graúdo e miúdo) e o resíduo foram caracterizados de acordo com os seguintes parâmetros: composição granulométrica (NBR NM 248, 2003); diâmetro máximo da partícula (NBR NM 248, 2003); módulo de finura (NBR NM 248, 2003); teor de finos (NBR NM 46, 2003); massa específica do agregado miúdo (NBR NM 52, 2009); e massa específica do agregado graúdo (NBR 53, 2009).

Como referência, foi adotado um traço referência (T_{REF}) através de uma alteração do traço desenvolvido por Guimarães (1999), com resistência à compressão (f_{ck}) de 50 MPa (28 dias). O T_{REF} foi produzido na proporção, em

relação a massa de cimento (kg/kg), de 1: 2: 2,88: 0,35 (cimento: agregado miúdo: agregado graúdo: água). A dosagem de aditivo superplastificante foi de 1% da massa de cimento. O consumo de cimento do T_{REF} (em kg de cimento por m^3 de concreto) foi de 408,16 kg/ m^3 .

A moldagem dos corpos de prova de concreto foi realizada em formas metálicas cobertas com óleo mineral cujas dimensões eram de 100 mm de diâmetro e 200 mm de altura. Após 24 horas o material foi desformado, identificado e colocado em câmara úmida (temperatura de aproximadamente 23 °C e umidade maior que 95%). Após um período de cura em câmara úmida, foram realizados ensaios de resistência à compressão axial (NBR 5739, 2018) com os corpos-de-prova cilíndricos na idade de sete dias, sendo removido da câmara cerca de 24 horas antes da realização do ensaio.

Planejamento experimental

Para investigar o uso de resíduo de fresado asfáltico como substituto parcial dos agregados naturais (miúdo e graúdo) foi desenvolvido um Delineamento Composto Central Rotacional (DCCR) com 11 ensaios (Tabela 1).

TABELA 1 – Planejamento experimental (DCCR) e resultados da resistência à compressão axial a sete dias.

Traço	Substituição Miúdo (%) ¹	Substituição Graúdo (%) ¹	Resistência à Compressão Axial (MPa)
1	4,39 (-1)	4,39 (-1)	44,9966
2	25,61 (+1)	4,39 (-1)	44,9900
3	4,39 (-1)	25,61 (+1)	34,9220
4	25,61 (+1)	25,61 (+1)	35,8580
5	0 (-1,41)	15 (0)	35,9240
6	30 (+1,41)	15 (0)	33,7300
7	15 (0)	0 (-1,41)	46,7840
8	15 (0)	30 (+1,41)	25,1560
9	15 (0)	15 (0)	41,3050
10	15 (0)	15 (0)	45,2525
11	15 (0)	15 (0)	46,3633
T_{REF} ²	-	-	43,0620

Nota:¹Valores codificados entre parênteses; ²Traço referência de alta resistência (GUIMARÃES, 1999).

Os dados experimentais foram analisados com o auxílio do *software* Protimiza Experimental Design, com nível de significância de 5%. Inicialmente, os efeitos significativos das variáveis independentes do processo foram calculados e com esses resultados foram determinados os coeficientes de regressão (β_0 , β_1 , β_{11} , β_2 , β_{22} , β_{12}) do modelo codificado (Equação 1).

$$Y = \beta_0 + \beta_1 X_1 + \beta_{11} X_1^2 + \beta_2 X_2 + \beta_{22} X_2^2 + \beta_{12} X_1 X_2 \quad (1)$$

A Equação 1 é uma equação polinomial de segunda ordem que relaciona a Resistência à Compressão Axial (Y) com as variáveis independentes que foram

codificadas segundo a Tabela 1: porcentagens de substituição do miúdo (x_1) e substituição do gráudo (x_2). Para verificar a qualidade de ajuste dos modelos, foi utilizada a Análise de Variância (ANOVA). Em seguida, foram obtidas a superfície de resposta e a curva de nível, sendo utilizadas para a definição das condições ótimas para a incorporação de resíduo de fresado asfáltico no concreto de alta resistência.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Caracterização dos agregados naturais e do resíduo

Na Tabela 2 estão apresentados os resultados da caracterização dos agregados naturais e do resíduo.

TABELA 2 – Caracterização dos agregados naturais e do resíduo.

	Diâmetro máximo da partícula (mm)	Módulo de finura	Teor de finos (%)	Massa específica (g/cm³)
Agregado miúdo	6,3	3,01	2,03	2,68
Resíduo (miúdo)	4,8	3,70	3,20	2,24
Agregado gráudo	25,0	-	0,54	2,87
Resíduo (gráudo)	25,0	-	0,84	2,65

Segundo o indicado na Tabela 2, o agregado miúdo natural pode ser classificado comercialmente como areia grossa (Zona 4) e o resíduo de fresado asfáltico (miúdo) pode ser classificado comercialmente como areia média (Zona 3). Já o agregado gráudo natural e também o resíduo (gráudo) podem ser classificados como Brita 1. De forma geral, estes resultados indicam que a britagem do resíduo, proveniente da fresagem asfáltica, foi adequada para que a faixa granulométrica se assemelhe ao perfil dos agregados naturais (miúdo e gráudo), viabilizando a incorporação do resíduo no concreto.

Efeitos da incorporação do resíduo

Na Tabela 1 estão apresentados os resultados da resistência à compressão axial (sete dias de idade) para todos os ensaios do planejamento experimental. Ademais, são apresentados os resultados do concreto de alta resistência de referência (sem utilização do resíduo). Segundo o indicado na Tabela 1, a resistência à compressão axial variou de 25,16 MPa (15% de substituição de miúdo e 30% de gráudo) a 46,78 MPa (15% de substituição de miúdo e zero de gráudo). Estes resultados indicam que a resistência à compressão axial depende das quantidades utilizadas na incorporação do resíduo no concreto. Assim, os efeitos padronizados do uso do resíduo de fresado asfáltico sobre a resistência à compressão axial são mostrados no diagrama de Pareto da Figura 1.

FIGURA 1 – Diagramas de Pareto para os efeitos padronizados das porcentagens de substituição do miúdo (x_1) e substituição do graúdo (x_2). Nível de significância de 5%.

Efeitos da substituição do agregado miúdo: Conforme observado na Figura 1, a substituição do agregado miúdo não apresentou efeitos estatisticamente significativos sobre a resistência à compressão axial do concreto, com 95% de confiança. De fato, conforme observado nos traços 1 e 2 da Tabela 1, o aumento de 4,39% para 25,61% da substituição do resíduo na fase miúda não resultou em uma queda da resistência à compressão axial do concreto. Essa tendência também foi observada nos traços 3 e 4, em que um aumento do uso do resíduo na fase miúda, do nível mais baixo para o mais alto, não ocasionou uma queda na resistência do concreto.

Ademais, ao se observar apenas o traço 7 (onde foi utilizando 100% do agregado graúdo natural e substituído 15% do agregado miúdo natural pelo resíduo) foi constada uma resistência de 46,7840 MPa, ou seja, um valor próximo ao traço de referência. Desta forma, estes resultados indicam que mesmo com o aumento expressivo do agregado miúdo não houve queda na resistência do concreto. Segundo Neville (2018), a porosidade típica dos agregados reciclados finos, normalmente, é uma das causas da queda de resistência em concretos que utilizam RCD, uma vez que podem ocasionar a absorção de parte da água da mistura.

O autor acima ainda cita que a resistência do concreto pode ser mantida quando são utilizados agregados reciclados que apresentam uma camada protetora que evita a absorção da água. Dessa forma, uma hipótese para o efeito não significativo do uso de resíduo como substituto do agregado miúdo, sobre a resistência à compressão axial do concreto, é que a presença do ligante asfáltico, sobre a elevada área de contato do resíduo miúdo, evitou que este retirasse água da mistura.

Efeitos da substituição do agregado graúdo: Conforme observado na Figura 1, a substituição do agregado graúdo apresentou um efeito negativo estatisticamente significativo sobre a resistência à compressão axial do concreto,

com 95% de confiança. Conforme observado nos traços 2 e 4 da Tabela 1, o aumento de 4,39% para 25,61% da substituição do resíduo na fase graúda resultou em uma queda na resistência à compressão axial do concreto, de 44,99 MPa para 35,86 MPa (queda de aproximadamente 9 MPa).

Essa tendência também foi observada nos traços 1 e 3, em que um aumento do uso do resíduo na fase graúda, do nível mais baixo para o mais alto, ocasionou uma queda na resistência do concreto (aproximadamente 10 MPa). Um efeito negativo ainda maior foi observado quando os traços 7 e 8 foram comparados, sendo observada uma queda na resistência de aproximadamente 21,6 MPa, ou seja, uma queda de quase 50% na qualidade do concreto.

Ao se observar apenas o traço 5 (onde foi utilizando 100% do agregado miúdo natural e substituído 15% do agregado graúdo pelo resíduo) foi constatada uma diminuição de aproximadamente 7 MPa em relação ao traço de referência (43,0620 MPa). Estes resultados estão de acordo com os resultados encontrados por Cabral et al. (2012) e Pepe et al. (2014), que observaram também uma queda na resistência à compressão em concretos que utilizaram maiores dosagens de agregado graúdo reciclado. Segundo Shetty (2000), o uso de agregados graúdos, em concretos de alta resistência, pode diminuir a resistência à compressão, sendo que as partículas maiores não favorecem a criação de pontes de aderência e também geram microfissuras entre o agregado e a zona de transição.

Otimização da incorporação do resíduo

Mediante os dados experimentais indicados na Tabela 1 e com o auxílio do *software* Protimiza Experimental Design, foi obtido um modelo matemático (Equação 2) que relaciona a resistência à compressão axial (Y) com as porcentagens de substituição no agregado miúdo (x_1) e no graúdo (x_2), variáveis codificadas segundo a Tabela 1.

$$Y = 44,31 - 0,27 x_1 - 3,54 x_1^2 - 6,22 x_2 - 2,97 x_2^2 + 0,24 x_1 x_2 \quad (2)$$

Para avaliar a qualidade de ajuste do modelo (Equação 2), na Tabela 3 são apresentados os resultados da Análise de Variância (ANOVA), sendo que os valores apresentados foram gerados pela tabela ANOVA do *software* Protimiza Experimental Design.

TABELA 3 – ANOVA do modelo preditivo para a resistência à compressão (Equação 2).

Fontes de Variação	Soma de Quadrados	Graus de Liberdade	Quadrado Médio	F_{cal}	F_{tab}	R^2
Regressão	404,6	5	80,9	5,2	5,05	0,8378
Resíduos	78,3	5	15,7			
Falta de ajuste	64,2	3	21,4	3,0	19,16	-
Erro puro	14,1	2	7,1			
Total	482,9	10	-	-	-	-

Legenda: F_{cal} : Distribuição de Fischer (calculada); F_{tab} : Distribuição de Fischer (tabelada); R^2 : Coeficiente de determinação.

Segundo os resultados assinalados na Tabela 3, observa-se que o modelo (Equação 2) pode ser considerado válido, pois, de acordo com a Tabela 3, verifica-se que: o coeficiente de determinação (R^2) é de 0,8378; o F_{cal} da regressão em relação aos resíduos é maior que o F_{tab} ; e o F_{cal} da falta de ajuste em relação ao erro puro é inferior ao F_{tab} . Desse modo, ao ajustar aos dados experimentais, o modelo pode ser utilizado para fins preditivos, com isso, satisfazendo os requisitos para a construção da superfície de resposta e curva de nível (Figura 2).

FIGURA 2 – Superfície de resposta (a) e Curva de contorno (b) para a resistência à compressão axial (MPa) em função das porcentagens de substituição do resíduo no miúdo (%) e no grão (%).

De acordo com o ilustrado pela Figura 2 e já relatado anteriormente, o efeito da substituição do agregado grão pelo resíduo de fresado asfáltico foi superior ao efeito da substituição do agregado miúdo. Conforme observado na Figura 2, um aumento do uso do resíduo na fase grãda, do nível mais baixo (zero) para o mais alto (30%), ocasionou uma queda na resistência à compressão axial do concreto.

A definição das condições ótimas para a incorporação de resíduo de fresado asfáltico em concreto de alta resistência depende do objetivo da otimização. Dessa forma, se o objetivo for obter um concreto com maior resistência à compressão axial (45 MPa aos 7 dias), recomenda-se, tendo como base a Figura 2b, utilizar as seguintes condições: substituir, no máximo, aproximadamente 14% do agregado grão pelo resíduo de fresado asfáltico; e utilizar a faixa ótima de substituição no agregado miúdo de 5% a aproximadamente 23,5%.

É válido ressaltar que os valores da resistência encontrados nessa faixa estão próximos da resistência do traço de referência indicado na Tabela 1 (43,0620 MPa aos 7 dias). Por outro lado, se o objetivo for incorporar o máximo de resíduo no concreto (por questões ambientais), e ainda mantendo uma resistência alta (45 MPa aos 7 dias), observa-se um ponto ótimo (Figura 2b) de aproximadamente 7,5% de substituição na fase grãda e 22,5% na fase miúda. Este ponto ótimo equivale a um total de 30% de incorporação do resíduo de fresado asfáltico em substituição parcial aos agregados naturais (fases grãda e miúda). Já se considerar que com a utilização da maior porcentagem de agregado grão pode-se ter uma economia na utilização do britador, e conseqüentemente em economia de energia elétrica, recomenda-se utilizar 14% do resíduo no grão e 15% no miúdo.

Para a validação do ponto ótimo (7,5% de substituição na fase graúda e 22,5% na fase miúda), em relação a máxima incorporação de resíduo no concreto, foram realizados testes de resistência à compressão axial (NBR 5739, 2018) com os corpos-de-prova cilíndricos na idade de 28 dias, sendo os resultados apresentados na Tabela 4.

TABELA 4 – Resultados da resistência à compressão axial a 28 dias.

Traço	Substituição Miúdo (%)	Substituição Graúdo (%)	Resistência à Compressão Axial (MPa)
T_{REF}^1	-	-	52,81
Ponto ótimo	22,5	7,5	50,85

Nota: ¹Traço referência de alta resistência (GUIMARÃES, 1999).

Conforme indicado na Tabela 4, o traço otimizado (ponto ótimo) apresentou uma resistência à compressão média de 50,85 MPa, ou seja, apenas 3,71% inferior ao traço referência (52,81 MPa). Estes resultados indicam que o concreto que utilizou o resíduo de fresado asfáltico, como substituto parcial dos agregados naturais (miúdo e graúdo), apresentou uma resistência próxima ao concreto de referência.

CONCLUSÕES

Os resultados demonstraram a viabilidade técnica em inserir o resíduo de fresado asfáltico, em substituição parcial aos agregados naturais para concretos estruturais de alta resistência, nas condições investigadas neste trabalho. O traço otimizado, em relação a máxima incorporação do resíduo (7,5% de substituição na fase graúda e 22,5% na fase miúda), apresentou uma resistência à compressão média (28 dias) de 50,85 MPa, sendo apenas 3,71% inferior ao traço referência (52,81 MPa). Desse modo, os resultados deste trabalho mostraram a eficiência na utilização da metodologia do planejamento experimental fatorial para determinar as condições ótimas para a incorporação de resíduo de fresado asfáltico em concreto de alta resistência.

REFERÊNCIAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR NM 248**: Agregados-Determinação da composição granulométrica. Rio de Janeiro, 2003.

_____. **NBR NM 46**: Agregados - Determinação do material fino que passa através da peneira 75 μ m, por lavagem. Rio de Janeiro, 2003.

_____. **NBR NM 52**: Agregado miúdo – Determinação da massa específica e massa específica aparente. Rio de Janeiro, 2009.

_____. **NBR NM 53**: Agregado graúdo – Determinação da massa específica, massa específica aparente e absorção de água. Rio de Janeiro, 2009.

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

BRASILEIRO, L. L.; MATOS, J. M. E. Revisão Bibliográfica: reutilização de resíduos da construção e demolição na indústria da construção civil. **Cerâmica**, v.61, n.358, p.178-189, 2015. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1590/0366-69132015613581860>>. Acesso em: 17/09/2019.

CABRAL, A. E. B.; SCHALCH, V.; DAL MOLIN, D. C. C.; RIBEIRO, J. L. D. Performane Estimation for Concretes Made with Recycled Aggregates of Construtuction and Demolition Waste of Some Brazilian Cities. **Materials Research**, v.15, n.6, p.1037-1044, 2012. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1590/S1516-14392012005000119>>. Acesso em: 22/09/2019.

CAMPOS, H. K. T. Renda e evolução da geração *per capita* de resíduos sólidos no Brasil. **Revista Engenharia Sanitária e Ambiental**, v.17, n.2, p.171-180, 2012. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1590/S1413-41522012000200006>>. Acesso em: 17/09/2019.

GIACCOM-RIBEIRO, B. M.; MENDES, C. A.B. Avaliação de parâmetros na estimativa da geração de resíduos sólidos urbanos. **Revista Brasileira de Planejamento e Desenvolvimento**, v.7, n.3, p.422-443, 2018. Disponível em: <<https://www.lume.ufrgs.br/handle/10183/188796>>. Acesso em: 18/09/2019.

GUIMARÃES, A. E. J. **Análise de pilares de concreto de alta resistência com adição de fibras metálicas submetidos à compressão centrada**. 1999. 145 f. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 1999.

JACINTHO, A. E. P. G. A. Módulo de elasticidade de concretos com agregados reciclados. **Matéria**, v.24, n.2, p.1-3, 2019. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1590/s1517-707620190002.0654>>. Acesso em: 18/09/2019.

KABAGIRE, K.D.; YAHIA, A. Modelling the properties of pervious concrete using a full-factorial design. **Road Materials and Pavement Design**, v.19, n.1, p.1-17, 2017. Disponível em: <<https://doi.org/10.1080/14680629.2016.1207557>>. Acesso em: 24/09/2019.

KRISHNAN, T.; PURUSHOTHAMAN, R. Optimization and influence of parameter affecting the compressive strength of geopolymer concrete containing recycled concrete aggregate: using full factorial design approach. **IOP Conference Series: Earth and Environmental Science**, v.80, n.1, p.1-8, 2017. Disponível em: < doi :10.1088/1755-1315/80/1/012013>. Acesso em: 24/09/2019.

MENG, W.; SAMARANAYAKE, V. A.; KHAYAT, K. H. Factorial Design and Optimization of Ultra-High-Performance Concrete with Lightweight Sand. **ACI Materials Journal**, v.115, n.1, p.129-138, 2018. Disponível em: < <https://www.concrete.org/publications/internationalconcreteabstractsportal/m/details/id/51700995> >. Acesso em: 24/09/2019.

NEVILLE, A. M. **Properties of Concrete**. 5 ed. Londres: Person Education, 2018.

PARGHI, A; ALAM, M.S. Seismic behavior of deficient reinforced concrete bridge piers confined with FRP – A fractional factorial analysis. **Engineering Structures**, v. 126, p. 531-546, 2016. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2016.08.011>>. Acesso em: 24/09/2019.

PEPE, M.; TOLEDO FILHO, R. D.; KOEDERS, E. A. B.; MARTINELLI, E. Alternative processing procedures for recycled aggregates in structural concrete. **Constructions and Building Materials**, v. 69, p.124-132, 2014. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2014.06.084>>. Acesso em: 22/09/2019.

ROCHA SEGUNDO, I.G.; CASTELO BRANCO, V.T.F.; VASCONCELOS, K.L.; HOLANDA, A.S. Misturas asfálticas recicladas a quente com incorporação de elevado percentual de fresado como alternativa para camada de módulo elevado. **Transportes**, v.24, n.4, p. 85-94, 2016. Disponível em: <<https://revistatransportes.org.br/anpet/article/view/1148/620>>. Acesso em: 18/09/2019.

RODRIGUES, M. I.; IEMMA, A. F. **Planejamento de experimentos e otimização de processos**. 3. ed. Campinas: Cárita, 2014.

SHETTY, M. S. **Concrete Technology: Theory and Practice**. 1 ed. Nova Deli: S. Chand & Company, 2000.

SHI, C.; WU, Z.; LV, K.; WU, L. A review on mixture design methods for self-compacting concrete. **Construction and Building Materials**, v.84, p.387-398, 2015. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.03.079>>. Acesso em: 24/09/2019.

SOUZA, L. D. P.; AZERÊDO, G. A.; SILVA, F. A. Comportamento do concreto sob altas temperaturas via planejamento experimental fatorial com configuração estrela. **Ambiente Construído**, v.18, n.1, p.327-344, 2018. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1590/s1678-86212018000100224>>. Acesso em: 18/09/2019.

THOMAS, R. J.; FELLOWS, A. J.; SORENSEN, A. D. Durability analysis of recycled asphalt pavement as partial coarse aggregate replacement in a high-strength concrete mixture. **Journal of Materials in Civil Engineering**, v. 30, n.5, 2018. Disponível em: <[https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)MT.1943-5533.0002262](https://doi.org/10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0002262)>. Acesso em: 18/09/2019.