

A variabilidade dos agregados provenientes de resíduos da construção civil e sua influência em concretos

LARA GUIZI ANONI – GRADUANDA

ANA PAULA MORENO TRIGO – PROFESSORA DOUTORA

INSTITUTO FEDERAL DE SÃO PAULO, CAMPUS VOTUPORANGA – IFSP

ISABELA PIETROBON – ENGENHEIRA, MESTRANDA

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO CARLOS – UFSCAR

RESUMO

EM PROL DE UM DESENVOLVIMENTO SUSTENTÁVEL, ESTUDOS SÃO PUBLICADOS NO SENTIDO DE AVALIAR POSSIBILIDADES PARA REUTILIZAÇÃO DOS RESÍDUOS DA CONSTRUÇÃO CIVIL (RCC) COMO AGREGADOS NO CONCRETO. É POSSÍVEL AFIRMAR QUE HÁ RESULTADOS FAVORÁVEIS QUANTO À SUBSTITUIÇÃO DA AREIA NATURAL. PORÉM, A PROBLEMÁTICA PARA VIABILIZAÇÃO ESTÁ NA HETEROGENEIDADE DESSES AGREGADOS. A PROPOSTA DESTE TRABALHO É CARACTERIZAR FISICAMENTE DIFERENTES AMOSTRAS DO AGREGADO MIÚDO RECICLADO E AVALIAR AS INFLUÊNCIAS DA VARIAÇÃO DESSAS CARACTERÍSTICAS EM MISTURAS

DE CONCRETO. AMOSTRAS DE AREIA DE RCC FORAM COLETADAS E ENSAIOS DE COMPOSIÇÃO GRANULOMÉTRICA, MASSA ESPECÍFICA, ABSORÇÃO DE ÁGUA, PORCENTAGEM DE FINOS E TEOR DE ARGILA E MATERIAIS FRIÁVEIS FORAM APLICADOS. EM SEGUIDA, PRODUZIRAM-SE MISTURAS DE CONCRETO QUE FORAM ENSAIADAS À COMPRESSÃO, MÓDULO DE ELASTICIDADE E ABSORÇÃO DE ÁGUA. COMO RESULTADOS, FOI POSSÍVEL IDENTIFICAR, ESTATISTICAMENTE, CARACTERÍSTICAS QUE INTERFEREM NO DESEMPENHO DOS CONCRETOS E APRESENTAR UMA FAIXA UTILIZÁVEL ENTRE OS AGREGADOS MIÚDOS DE RCC.

Palavras-chave: *resíduo da construção civil, agregados reciclados, desenvolvimento sustentável, caracterização, concreto.*

I. INTRODUÇÃO

A construção civil é um dos setores econômicos que cresce gerando oportunidade de desenvolvimento e qualidade de vida para o país. Em contrapartida, este é um setor que consome grande parte dos recursos disponíveis na natureza e, além disso, encerra seu ciclo com quantidades significativas de resíduos.

Pinto (1999) *apud* Brasileiro *et al* (2015) afirma que, da massa total de resíduos sólidos produzida no Brasil, entre 41% a 70% provém da construção civil. Esse material demanda trabalho logístico para correta disposição final e ocupa espaço nos aterros do país.

Uma das alternativas para lidar com os dilemas da falta de recursos e carência de locais para a deposição é a reutilização dos resíduos. Galego (2019) analisou misturas com substituição de 50% do agregado miúdo natural pelo agregado de resíduos da construção civil (RCC) e obteve concretos com RCC que atingiram resistências superiores em até 27,8% em relação as dos concretos de referência.

Atualmente, existem no Brasil centrais de coleta e manejo de entulho que beneficiam o resíduo, transformando-o em agregados. O problema é que a produção do agregado de RCC não baseada na eficiência de concretos dificulta

sua uniformização para consumo em larga escala e, assim, o mercado não absorve a oferta dessa matéria prima.

A proposta deste artigo é que se identifique os parâmetros do agregado miúdo de RCC que mais influenciam no desempenho de concretos, para que o problema de variabilidade desse material seja solucionado desde a sua produção.

2. PROGRAMA EXPERIMENTAL

A pesquisa foi desenvolvida a partir de coletas periódicas de amostras de agregado miúdo reciclado de RCC e aplicação de ensaios laboratoriais, seguindo e referenciando todas as normas técnicas

brasileiras pertinentes ao tema. Todos os ensaios foram realizados no Laboratório de Materiais do Departamento de Engenharia Civil do Instituto Federal de São Paulo, campus Votuporanga.

2.1 Amostras de areia RCC

Para esta pesquisa, relativa à uma análise de influência, o número mensal de amostras de agregado miúdo reciclado a ser coletado foi definido estatisticamente:

$$n = \left(\frac{t_{n-1; \alpha/2} \times S_n}{e_0} \right)^2 ; e_0 = t_{\alpha/2} \frac{S}{\sqrt{n}} \quad [1]$$

Sendo:

- n o número de elementos de uma amostra piloto;
- S o desvio padrão da amostra piloto;
- α o nível de significância dos resultados, adotado como 5% para esta pesquisa.

Assim, um total de 8 amostras de areia de RCC, doadas por empresa beneficiadora de Votuporanga-SP, foram analisadas. A Figura 1 apresenta a diferença visual entre elas.

Com a finalidade de garantir uma futura aplicação dos ensaios nas centrais de produção do agregado miúdo reciclado, optou-se por uma caracterização física. As amostras foram caracterizadas com determinação da composição granulométrica (ABNT NBR NM 248:2003), determinação do teor de argila em torrões e materiais friáveis (ABNT NBR 7218:2010), determinação do material fino que passa através da peneira 75 μ m, por lavagem (ABNT NBR NM 46:2003), determinação



► **Figura 1**

Amostras coletadas e, em destaque, a amostra que mostrou maior desempenho nos concretos (8)

Fonte: os autores (2020)

da absorção de água (ABNT NBR NM 30:2001) e determinação de massa específica (ABNT NBR NM 52:2009).

As únicas variáveis da análise estatística deste trabalho são as areias de RCC, logo, não há necessidade de detalhamento completo dos demais materiais. Cabe somente ressaltar que para este estudo foi utilizada a brita 2, adquirida na região de Votuporanga-SP, bem como o cimento, do tipo CP II 32. O aditivo superplastificante foi doado por empresa da região de Votuporanga-SP. O uso do aditivo é baseado no fato de que areia de RCC absorve muita água, reduzindo a trabalhabilidade da mistura.

2.2 Dosagem e propriedades dos concretos

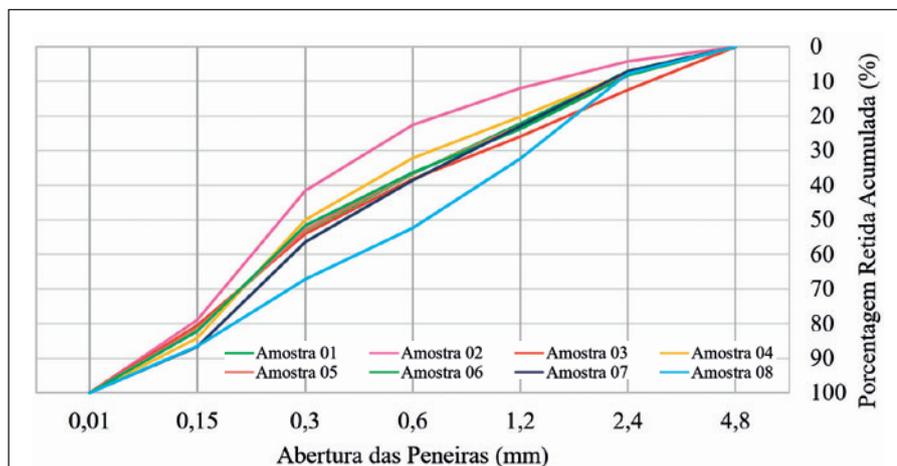
A metodologia de dosagem escolhida baseou-se em estudos prévios, que mostraram eficiência nos resultados de resistência de concretos com o RCC dosados com o método IPT. Assim, os traços foram obtidos a partir de interpolações entre traços iniciais e parâmetros de curvas de dosagem já criadas para concretos com substituição parcial do agregado natural pelo agregado reciclado em 50%. Fixando um consumo de cimento de 310 kg/m³, os demais parâmetros, como massa total de agregados, relação água/cimento (a/c) e resistência característica à

► **Tabela 1 – Composição do traço dosado para esta pesquisa, fixando um slump de 120mm**

	Traço*	F _{ck28} (MPa)**	a/c	m (kg)	Cc (kg/m ³)
T50	1:1,272 : 1,163 : 3,690 : 0,588	25,66	0,588	6,235	310,00

* Foi adicionado ao traço o aditivo GLENIUM 51 em 0,5% do consumo de cimento; ** Estimado. Fonte: os autores (2020).





► **Figura 2**

Curvas de composições granulométricas das amostras das areias de RCC

Fonte: os autores (2020)

nulométrica das amostras permitiu identificar diferença entre os módulos de finura da produção diária na central, o que pode ser visto na Tabela 2. As curvas granulométricas foram plotadas em um mesmo gráfico (Figura 2). É perceptível que todas as curvas apresentam areias bem graduadas, porém as curvas 02 e 08 apresentam um comportamento minimamente diferente, com maior acúmulo de material nas peneiras mais finas para a primeira e nas peneiras mais grossas para a segunda. Isso condiz com o que se observa em fotografia, na Figura 1.

Realizados os ensaios de torrões de argila, verificou-se uma grande variação entre os resultados – a maior dentre todas as análises – o que não seria possível considerar satisfatório, mas o que já era esperado, afinal não há controle durante a produção dessas areias, e argila pode ou não estar presente entre os materiais triturados (Tabela 2). O teor de finos também variou consideravelmente entre as diferentes amostras, apresentando valores entre 3,91% e 12,29%.

A absorção de água foi verificada para apenas 6 das 8 amostras, partindo do princípio de que em estudos prévios esta foi a propriedade

compressão aos 28 dias, foram estimados e estão descritos na Tabela 1.

Para a análise de propriedades nos concretos, corpos de prova de 10x20 cm foram confeccionados. Um total de 8 misturas, iguais a não ser pela amostra de areia RCC, foram sujeitas, no estado endurecido, aos ensaios de resistência à compressão (ABNT NBR 5739:2018), ao módulo de elasticidade (ABNT NBR 8522:2017) e à absorção de água (ABNT NBR 9778:2009).

amostras do agregado reciclado, bem como análises das influências destas características nas propriedades dos concretos.

A partir dos resultados característicos das amostras de agregado reciclado e dos ensaios nos concretos produzidos com as respectivas amostras, uma análise de variância aplicada à regressão linear foi proposta para cada propriedade física. Para medir o nível de confiança deste experimento, o valor referência de 95% foi utilizado.

3. RESULTADOS

A seguir, são apresentados os resultados obtidos entre as diversas

3.1 Caracterização das amostras

A análise de composição gra-

► **Tabela 2 – Resultados dos ensaios de caracterização física para as amostras das areias de RCC**

	1	2	3	4	5	6	7	8	σ	σ^2
Módulo de finura	2,01	1,60	2,11	1,94	2,02	2,02	2,12	2,46	0,24	0,06
Torrões de argila (%)	14,27	13,45	13,93	12,11	5,78	8,79	4,26	5,39	4,19	16,60
Teor de finos (%)	9,03	7,14	7,93	10,47	9,90	12,29	3,91	5,04	2,80	7,87
Massa específica (g/cm ³)	2,39	2,49	2,45	2,42	2,45	2,36	2,39	2,32	0,05	0,003
Absorção de água (%)	7,04	4,81	6,69	—	—	6,76	6,53	7,56	0,93	0,87

Fonte: os autores (2020).

► Tabela 3 – Valores de resistência à compressão aos 28 dias, por traço

Traço	$F_{ck,28}$ (MPa)	Mínimo (MPa)	Máximo (MPa)	σ	σ^2
T50-01	23,90	23,72	24,23	0,23	0,05
T50-02	21,48	21,38	21,54	0,08	0,01
T50-03	23,40	22,02	24,69	1,19	1,43
T50-04	23,38	22,99	23,79	0,30	0,09
T50-05	23,79	21,80	25,36	1,27	1,62
T50-06	24,25	23,01	25,40	1,03	1,05
T50-07	25,47	25,14	25,88	0,31	0,10
T50-08	27,31	25,28	28,07	1,16	1,34

Fonte: os autores (2020).

que sofreu menores variações, o que influencia no cálculo do tamanho do espaço amostral. Por isso, as amostras 04 e 05 foram desconsideradas. Foi possível perceber que a amostra 02 é a que mais se difere da média entre os demais valores.

Os ensaios de massa específica das amostras apresentaram os resultados com a menor variação entre as demais propriedades analisadas, com valores de mínimo e máximo iguais a 2,32 g/cm³ e 2,49 g/cm³, respectivamente. Isso ocorre, pois, a mistura de diferentes materiais (com suas respectivas massas específicas), em proporções desiguais a cada nova trituração, aumenta ou diminui a massa específica do conjunto.

3.2 Respostas dos concretos

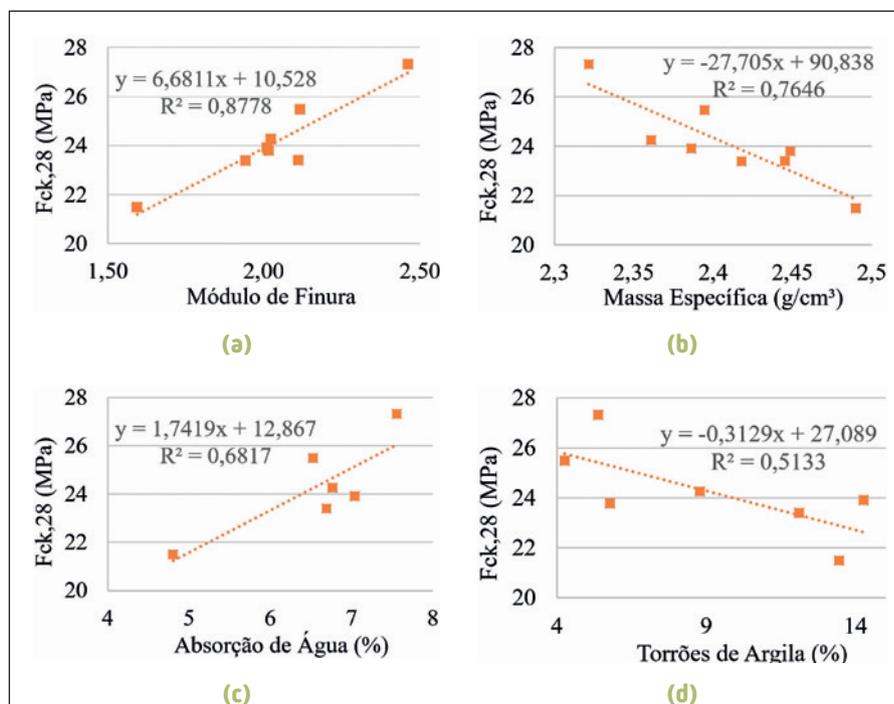
3.2.1 RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO

Para todos os traços, foram tabeladas as medidas descritivas de resistência à compressão característica aos 28 dias, calculadas a partir de resultados de 5 corpos de prova cada traço (Tabela 3). Com um

desvio padrão de 1,70 nos resultados entre os traços e com variação de resistência entre 21,48 MPa e 27,31 MPa, há certa preocupação sobre os fatores que influenciam esta variabilidade. O uso da regressão

linear permitiu identificar uma possível relação entre módulo de finura das areias (a), massa específica (b), absorção de água (c) e torrões de argila (d), e as variações no f_{ck} (Figura 3).

As Tabelas 4 e 5 resumem as análises de variância (ANOVA) empregadas para comprovar a hipótese de que a regressão linear explica as interferências nos resultados de resistência à compressão. Pode-se afirmar que a variação do módulo de finura (MF) entre as amostras afetou a propriedade de resistência dos corpos de prova ($F_0 \gg F_{crit}$). Com relação à resistência estimada de 25,66 MPa, apenas as areias recicladas com MF superior à 2,26 alcançam o valor, segundo a equação de crescimento linear encontrada e comprovada em (a).



► Figura 3

Regressão linear entre a resposta de resistência à compressão e as variáveis físicas analisadas das areias de RCC

Fonte: os autores (2020)



► Tabela 4 – Resultados da análise ANOVA para regressão linear entre as variáveis e a resposta resistência à compressão

Fonte	G.L.	Módulo de finura			Massa específica			Torrões de argila			F _{crit}
		SQ	QM	F ₀	SQ	QM	F ₀	SQ	QM	F ₀	
Regressão	1	17,77	17,77	43,10	15,48	15,48	19,48	11,17	11,17	7,38	—
Resíduo	6	2,47	0,41	—	4,77	0,79	—	9,08	1,51	—	5,99
Total	7	20,25	—	—	20,25	—	—	20,25	—	—	—

Fonte: os autores (2020).

A massa específica dos agregados miúdos reciclados também teve influência comprovada na resistência à compressão ($F_0 > F_{crit}$), mas no sentido inversamente proporcional; assim, amostras com massa específica abaixo de 2,35 g/cm³ mostraram-se mais eficientes no incremento da resistência. Evidentemente, o que reduz a massa específica das

amostras é a presença em maior porcentagem de material cerâmico, o material mais leve dentre os constituintes. Leite e Molin (2002) afirmam que o material cerâmico, parte dos constituintes do agregado reciclado, possui certa atividade pozolânica com o cimento, sendo provável que isso contribua para o incremento de resistência nos concretos.

A mesma relação foi constatada para os torrões de argila e a resistência à compressão ($F_0 > F_{crit}$), quanto maior o teor de argila da amostra, menores as resistências registradas nos CPs. Os resultados, portanto, mostram a eficiência dos concretos com teores de argila abaixo de 4,57%.

Também se confirma a hipótese de que quanto maior a absorção de água por parte dos agregados, maior a resistência à compressão ($F_0 > F_{crit}$), sendo que apenas valores acima de 7,34% garantem que a mistura atinja a resistência requerida. Isso ocorre, pois, a absorção de água pelos agregados reduz a quantidade de água livre inicialmente na pasta e depois funciona como cura interna do concreto. Miranda apud Ângulo (2000) mostra que argamassas com maior resistência podem ser produzidas com RCC devido à correção de água que a presença dos grãos absorptivos garante.

O coeficiente de determinação (R^2) baixo, principalmente nos casos (c) e (d) da Figura 3, ocorre devido à influência das variáveis físicas do agregado na resistência à compressão.

► Tabela 5 – Resultados da análise ANOVA para regressão linear entre a variável absorção de água e a resposta resistência à compressão

Fonte	G.L.	Absorção de água			
		SQ	QM	F ₀	F _{crit}
Regressão	1	13,21	13,21	8,56	—
Resíduo	4	6,18	1,54	—	7,71
Total	5	19,39	—	—	—

Fonte: os autores (2020).

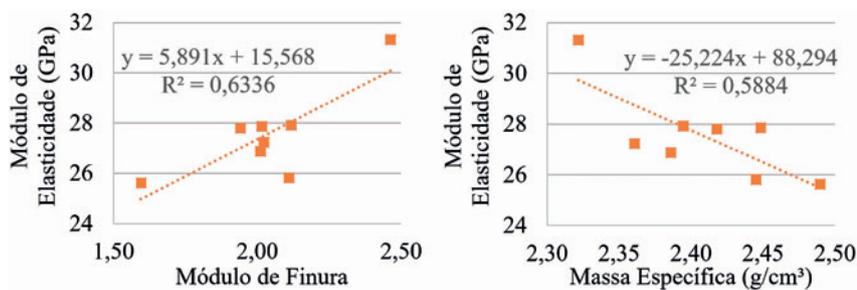
► Tabela 6 – Valores de módulo de elasticidade aos 28 dias, por traço

Traço	E (GPa)	Mínimo (MPa)	Máximo (MPa)	σ	σ^2
T50-01	26,87	25,52	27,59	1,17	1,38
T50-02	25,62	24,63	26,75	1,12	1,26
T50-03	25,81	25,07	26,36	0,66	0,44
T50-04	27,80	27,14	28,98	0,83	0,69
T50-05	27,86	27,00	29,25	0,99	0,99
T50-06	27,24	26,33	28,39	0,86	0,74
T50-07	27,91	26,57	29,12	1,05	1,10
T50-08	31,32	30,13	32,45	1,01	1,02

Fonte: os autores (2020).

3.2.2 MÓDULO DE ELASTICIDADE

O módulo de elasticidade aos



► **Figura 4**
Regressão linear entre a resposta módulo de elasticidade e as variáveis das areias de RCC

Fonte: os autores (2020)

28 dias foi obtido pelo ensaio de 4 corpos de prova por traço (Tabela 6). A regressão linear foi construída entre os resultados de módulo de elasticidade e as propriedades físicas do RCC. Assim, constatou-se uma correlação com o módulo de finura das areias e massa específica, visto respectivamente em (a) e (b) da Figura 4.

Assim como na resposta de resistência à compressão, confirma-se pela ANOVA (Tabela 7) a forma linear direta da correlação entre o módulo de elasticidade

e o módulo de finura ($F_0 > F_{crit}$) e inversa entre aquele e a massa específica ($F_0 > F_{crit}$). O baixo coeficiente de determinação se deve às relações entre resistência à com-

pressão e o módulo de elasticidade, afinal, sabe-se que existe correlação direta entre esses parâmetros.

Além disso, estudos como o de Papini et al (2020) apontam que o baixo módulo de elasticidade (adotando 34,04 GPa como referência para um concreto com a resistência estimada inicialmente, com base na ABNT NBR 6118 (2014)) da mistura se relaciona com o baixo módulo de elasticidade dos agregados.

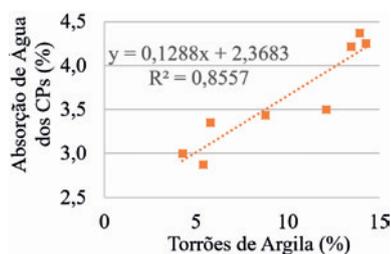
3.2.3 ABSORÇÃO DE ÁGUA

Para avaliar a absorção de água dos concretos, foram produzidos 3 corpos de prova para cada traço (Tabela 8). Foi possível identificar,

► **Tabela 7 – Resultados da análise ANOVA para regressão linear entre as variáveis e a resposta módulo de elasticidade**

Fonte	G.L.	Módulo de finura			Massa específica			
		SQ	QM	F_0	SQ	QM	F_0	F_{crit}
Regressão	1	13,82	13,82	10,38	12,83	12,83	8,58	
Resíduo	6	7,99	1,33	—	8,98	1,50	—	5,99
Total	7	21,81	—	—	21,81	—	—	—

Fonte: os autores (2020).



► **Figura 5**
Regressão linear entre a resposta absorção de água dos CPs e a variável teor de argila em torrões das amostras de RCC

Fonte: os autores (2020)

► **Tabela 8 – Valores de absorção de água do concreto aos 28 dias, para cada traço**

Traço	A_{med} (%)	Mínimo (MPa)	Máximo (MPa)	σ	σ^2
T50-01	4,25	4,21	4,29	0,07	0,00
T50-02	4,22	3,96	4,56	0,04	0,09
T50-03	4,37	3,98	4,76	0,31	0,15
T50-04	3,50	3,39	3,56	0,39	0,01
T50-05	3,35	3,18	3,67	0,10	0,08
T50-06	3,44	3,24	3,60	0,28	0,03
T50-07	3,00	2,98	3,03	0,18	0,00
T50-08	2,87	2,82	2,97	0,02	0,01

Fonte: os autores (2020).



► Tabela 9 – Resultados da análise ANOVA para regressão linear entre a variável absorção de água e a resposta resistência à compressão

Fonte	G.L.	Absorção de água			
		SQ	QM	F ₀	F _{crit}
Regressão	1	2,04	2,04	35,54	—
Resíduo	6	0,34	0,06	—	5,99
Total	7	2,39	—	—	—

Fonte: os autores (2020).

com regressão linear, uma possível correlação entre a absorção de água dos concretos e o teor de argila em torrões e materiais friáveis das amostras de areia RCC. A Figura 5 apresenta o resultado da regressão.

Em análise da Tabela 9, é possível afirmar que a absorção de água do concreto endurecido cresce linearmente com o incremento do teor de argila ($F_0 > F_{crit}$). No momento em que grãos de argila envolvem o agregado, há uma perda na aderência na ligação deste material com a matriz cimentícia, e conseqüente aumento na existência de vazios nessa região. Isso reconfirma o fato de que quanto maior o teor de argila, menor a resistência à compressão.

4. CONCLUSÕES

A pesquisa permitiu identificar a interferência do módulo de finura, massa específica, torrões de argila e absorção de água das areias recicladas na resistência à compressão do concreto e verificar a problemática da variabilidade das areias recicladas, afinal os resultados aos 28 dias registraram uma amplitude de 6 MPa. Apesar disso, algumas misturas com areia RCC atingiram a resistência estimada, o que permitiu identificar as melhores faixas de resultados para as propriedades caracterizadas. Logo, seria possível pontuar requisitos para o concreto estrutural com RCC, assim como existente em norma para o não estrutural (ABNT NBR 15116:2004). O uso da regressão linear na variável

teor de finos mostrou dispersão nos valores, portanto, não foi possível identificar sua influência nos concretos. Quanto ao módulo de elasticidade, foi possível encontrar influências do módulo de finura e massa específica do agregado reciclado, o que implicou em 5,51 GPa de amplitude. Apesar de incremento de absorção de água nas misturas de todas as amostras de RCC, pela comprovada presença elevada dos torrões de argila, o método de dosagem garantiu uma matriz coesa, com teores de absorção dentro dos parâmetros normativos. Indica-se, portanto, para um controle de qualidade dos concretos produzidos com o RCC dosados pelo método IPT, que as propriedades de agregado miúdo descritas neste trabalho sejam verificadas.

AGRADECIMENTOS

Aos técnicos do Laboratório de Materiais do Instituto Federal de São Paulo – campus Votuporanga. Ao Programa Institucional de Bolsas de Iniciação Científica e Tecnológica do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de São Paulo (PIBIFSP), deixo aqui os sinceros agradecimentos. 

► REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] ÂNGULO, Sérgio Cirelli. Variabilidade de agregados graúdos de resíduos de construção e demolição reciclados. São Paulo: 2000, 155 p. Dissertação (Mestrado) – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. Departamento de Engenharia de Construção Civil. São Paulo, 2000.
- [2] BRASILEIRO, L. L. et al. Revisão bibliográfica: reutilização de resíduos da construção e demolição na indústria da construção civil. *Cerâmica* 61. 2015, p. 178-189.
- [3] GALEGO, Gabriela dos Santos. Estudo de dosagens de concretos estruturais com resíduos de construção e demolição. Orientador: Ana Paula Moreno Trigo. 2019. Trabalho de conclusão de curso - Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia, Campus Votuporanga. Votuporanga, 2019.
- [4] LEITE, M.B., MOLIN, D.D. Avaliação da atividade pozolânica do material cerâmico presente no agregado reciclado de resíduo de C&D. *Sitientibus*. Feira de Santa: n. 26, 2002, pp. 111-130.
- [5] PAPINI, A. et al. Concreto Autoadensável com Substituição do Agregado Graúdo Natural por Resíduos de Construção Civil. In: 62º Congresso Brasileiro de Concreto, 2020, Florianópolis – SC. IBRACON. Florianópolis: Instituto Brasileiro do Concreto, 2020.