

CONCRETO PRODUZIDO COM BAIXO CONSUMO DE CIMENTO PORTLAND E INCORPORAÇÃO DE PÓ DE PEDRA A PARTIR DO EMPACOTAMENTO DE AGREGADOS NA MISTURA

TAINÁ SARAMENTO¹; CAMILA VOLTOLINI MORETÃO²;
MATHEUS AGUSTINI³; SÍLVIA SANTOS^{4*}.

¹Engenheira Civil, UNIVALI, Itajaí-SC, tainasaramento@hotmail.com;

²Graduanda em Engenharia Civil, UNIVALI, Itajaí-SC, camilavoltolinim@hotmail.com;

³Engenheiro Civil, UNIVALI, Itajaí-SC, matheus-agustini@hotmail.com;

⁵Professora Doutora, UNIVALI, Itajaí-SC, ssantos@univali.br.

Apresentado no
Congresso Técnico Científico da Engenharia e da Agronomia – CONTECC'2018
21 a 24 de agosto de 2018 – Maceió – AL, Brasil.

RESUMO: Este trabalho objetivou avaliar o comportamento mecânico e requisitos de durabilidade de concretos produzidos com reduzido consumo de cimento Portland e incorporação do resíduo pó de pedra, a partir da técnica de empacotamento de agregados na mistura. Foram confeccionados quatro traços, sendo eles o Referência – esse que teve por função servir de parâmetro aos demais traços no que se refere à interpretação e análise de resultados obtidos –, o Concreto 01, o Concreto 02 e o Concreto 03. O ensaio de resistência à tração por compressão diametral evidenciou que os concretos aqui produzidos são considerados estatisticamente iguais, e quanto ao ensaio que mensurou a profundidade de carbonatação, constatou-se que essa foi praticamente nula perante as condições de exposição dos corpos de prova. Por fim, pode-se concluir que a inserção do pó de pedra na mistura por meio da técnica do empacotamento de agregados não influenciou negativamente o resultado dos ensaios abordados, sendo o pó de pedra um material apto a ser incorporado em misturas de concreto sem que haja perda de resistência mecânica.

PALAVRAS-CHAVE: Empacotamento de agregados; consumo de cimento Portland; pó de pedra.

CONCRETE PRODUCED WITH LOW CONSUMPTION OF PORTLAND CEMENT AND INCORPORATION OF STONE DUST FROM THE PACKING OF AGGREGATES IN THE MIXTURE

ABSTRACT: This work aimed to evaluate the mechanical behavior and durability requirements of concretes produced with low Portland cement consumption and incorporation of the stone dust residue, using the technique of packing aggregates in the mixture. Four ratios were made, and they were the Reference - the one that served as a parameter to the other ratios in what concerns the interpretation and analysis of results obtained - Concrete 01, Concrete 02 and Concrete 03. The diametrical compression tensile strength test showed that the concretes produced here are considered to be statistically equal, and for the test that measured the depth of carbonation, it was verified that this was practically null before the conditions of exposure of the specimens. Finally, it can be concluded that the insertion of the stone dust into the mixture by means of the aggregate packaging technique did not negatively influence the results of the tests discussed, the stone dust being a material able to incorporate concrete mixtures without any loss of mechanical resistance.

KEYWORDS: Packing of aggregates, consumption of Portland cement, stone dust.

INTRODUÇÃO

Minimizar as emissões de dióxido de carbono (CO₂) no planeta, gás esse considerado um dos principais agentes causadores do efeito estufa, é um dos desafios relacionados à produção de cimento Portland, responsável por aproximadamente 5% das emissões totais. Tal fato se deve ao desenvolvimento global e crescimento da indústria da construção civil, demandando gradativamente elevados volumes de concreto. Contudo, a redução do consumo de cimento nas misturas de concreto é

vista como uma medida sustentável, a fim de minimizar os impactos ambientais no que diz respeito a produção de cimento (KANNAN et al., 2017) (Tradução nossa).

Tendo em vista a necessidade de redução da exploração de matéria-prima virgem de origem mineral não renovável, o emprego do pó de pedra tanto como adição quanto substituição parcial ou total dos agregados miúdos no concreto de cimento Portland é apontada como uma medida de caráter sustentável, cuja viabilidade é alcançada pelas propriedades mecânicas satisfatórias do material. Além disso, o pó de pedra apresenta custo reduzido no mercado da construção civil.

Deste modo, a fim de se reduzir o consumo de cimento Portland ao mesmo tempo que se adiciona o resíduo pó de pedra nas misturas de concreto, tem-se a técnica de empacotamento de agregados.

Para Tutikian (2007) o empacotamento de agregados determina a proporção entre dois materiais distintos, de modo que se obtenha o máximo preenchimento do volume de vazios no concreto. Deve-se empacotar todos os materiais em combinações binárias, na ordem decrescente de diâmetro das partículas, até que se chegue no aglomerante, o único componente não adicionado ao processo. Mehta e Monteiro (2014) ressaltam que a quantificação do empacotamento é obtida por meio da densidade do empacotamento, considerada como o volume sólido em uma unidade de volume total.

MATERIAIS E MÉTODOS

Utilizou-se o cimento Portland de alta resistência inicial (CPV – ARI), fabricado pela empresa VOTORANTIM CIMENTOS® para a produção dos concretos propostos. Foram empregados ainda, três agregados miúdos, sendo um deles o pó de pedra, e três agregados graúdos, todos de origem granítica.

Para o empacotamento de agregados, tomou-se como base a técnica experimental de Tutikian (2007), assim como os procedimentos prescritos pela NBR NM 45:2006. O empacotamento de agregados foi realizado se adotando os seis agregados, e ao final desse, as misturas ideais de agregado graúdo e miúdo – menor índice de vazios – foram empacotadas, gerando assim a mistura final idealizada pela presente pesquisa, cujo índice de vazios foi de 31,36%.

Foram produzidos no total quatro traços, sendo eles: Referência, Concreto 01, Concreto 02 e Concreto 03. O concreto Referência que serviu de parâmetro aos demais traços confeccionados, foi disponibilizado por uma central dosadora de concreto da região do Vale do Itajaí, o qual é caracterizado por uma resistência à compressão característica aos 28 dias (*fck*) de 40 MPa e abatimento de tronco de cone de (10 ± 2) cm. O Quadro 1 ilustra o traço do concreto adotado como referencial.

Quadro 1. Traço referência (em massa).

Traço referência				
Cimento	Areia natural II	Areia natural I	Brita granítica III	Água
1,00	0,61	1,13	2,41	0,55

A partir do empacotamento de agregados, deu-se origem a um novo traço, obedecendo as proporções de compactação preestabelecidas. Tal traço é caracterizado por possuir a quantidade absoluta de agregados equivalente à do traço referência ($m= 4,15$). Sendo assim, o traço disposto no Quadro 2 serviu como base para a produção dos demais concretos.

Quadro 2. Traço após empacotamento de agregados (em massa).

Traço empacotamento de agregados							
Cimento	Areia natural II	Areia natural I	Pó de pedra	Brita granítica III	Brita granítica II	Brita granítica I	Água
1,00	0,50	1,05	0,12	1,00	1,05	0,45	0,55

Apesar de os três concretos provenientes do empacotamento de agregados possuírem o mesmo traço, esses diferem entre si no que se refere ao consumo de cimento (Quadro 3). Esse teve sua redução baseada no que tange a NBR 12655:2015, para a classe de agressividade ambiental III.

Quadro 3. Consumo de cimento Portland dos traços produzidos.

Nomenclatura	Descrição	Consumo de cimento (kg/m³)
Referência	Concreto referência	406,49
Concreto 01	Empacotamento de agregados	363,24
Concreto 02	Empacotamento de agregados	320,00
Concreto 03	Empacotamento de agregados	276,76

RESULTADOS E DISCUSSÃO

✓ Resistência à tração por compressão diametral

Para o ensaio de tração por compressão diametral, denominada tração indireta pela NBR 6118:2014, foram realizadas oito determinações para cada traço produzido, cujos resultados foram submetidos ao teste de normalidade com 95% de confiança, assim como à verificação de valores espúrios, esses sendo descartados quando presentes. A Tabela 1 traz os resultados de tração por compressão diametral dos concretos produzidos, os desvios-padrão e coeficientes de variação calculados.

Tabela 1. Resistência à tração indireta média aos 28 dias dos concretos produzidos.

Traço	Resistência à tração indireta (MPa)	Desvio-padrão (MPa)	Coefficiente de variação (%)
Referência	3,05	0,24	8,04
Concreto 01	3,37	0,53	15,64
Concreto 02	2,97	0,41	13,91
Concreto 03	3,36	0,13	3,95

Analisando-se a Tabela 1, foi perceptível que o Concreto 01 se mostrou superior numericamente aos demais traços, com 3,37 MPa, seguido pelo Concreto 03, com 3,36 MPa, e pelo concreto Referência, com 3,05 MPa. O Concreto 02 apresentou uma resistência de 2,97 MPa, a menor dentre os traços produzidos, com uma queda de 11,76% se comparado ao de maior resistência, e de 2,53% se comparado ao Referência. Contudo, a análise múltipla de médias de Nanni (1986) evidenciou que, com um grau de confiabilidade de 95%, os concretos produzidos, sem exceções, não diferem significativamente entre si, não podendo ser considerados, estatisticamente, diferentes.

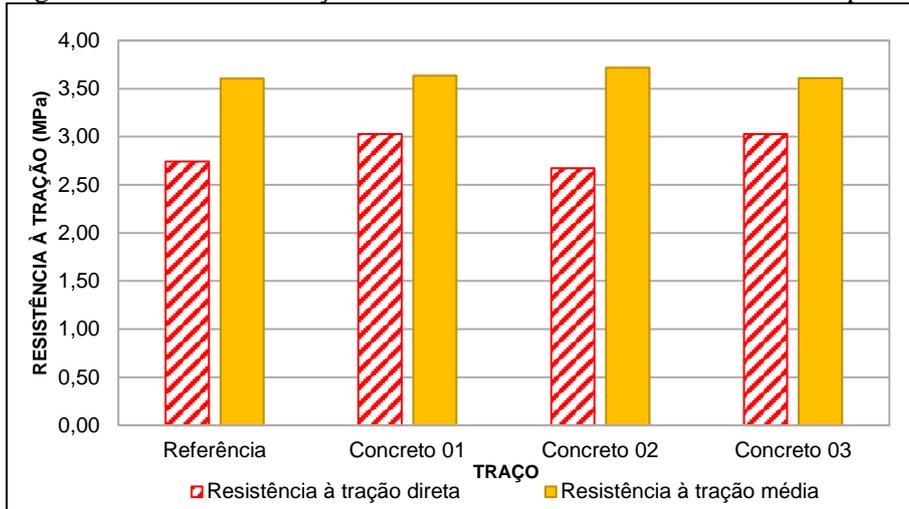
Atenta-se ao fato de que o Concreto 02, que nesta etapa representou o traço de menor tração, numericamente, foi o que se destacou no ensaio de resistência à compressão axial, para os mesmos 28 dias de cura (Tabela 2).

Tabela 2. Resistência à compressão axial média aos 28 dias dos concretos produzidos.

Traço	Resistência à compressão axial (MPa)	Desvio-padrão (MPa)	Coefficiente de variação (%)
Referência	41,64	1,79	4,30
Concreto 01	42,20	0,85	2,02
Concreto 02	43,63	1,40	3,21
Concreto 03	41,70	0,98	2,35

Dessa maneira, efetuou-se a comparação (Figura 1) entre a resistência à tração direta, obtida a partir da resistência à tração indireta (NBR 7222:2011), e a resistência à tração média (NBR 6118:2014), fazendo-se uso dos resultados de resistência à compressão axial aos 28 dias.

Figura 1. Resistência à tração direta e média aos 28 dias dos concretos produzidos.



Com base na Figura 1, pode-se constatar que os valores de tração média de todos os traços produzidos se mostraram superiores, numericamente, aos de tração direta. Todavia, os valores obtidos a partir do ensaio realizado em laboratório se sobressaem quando comparados aos valores determinados por metodologias teóricas, uma vez que, a atividade laboratorial, de modo geral, simula com maior autenticidade a realidade prática do comportamento do material sob esforços solicitantes.

✓ **Profundidade de carbonatação**

O ensaio que verificou a presença de carbonatação nos concretos se sucedeu em oito determinações para cada traço produzido (Quadro 4). O ensaio em questão se tornou pertinente devido à redução do volume de poros e aumento da compactidade dos concretos produzidos a partir do empacotamento de agregados, o que implicaria, possivelmente, numa maior dificuldade de formação do carbonato de cálcio.

Quadro 4. Profundidade de carbonatação média dos concretos produzidos.

Traço	Profundidade de carbonatação média	
	28 dias (mm)	91 dias (mm)
Referência	0,00	0,50
Concreto 01	0,00	0,50
Concreto 02	0,00	0,50
Concreto 03	0,00	0,50

A Quadro 4 indica valores de profundidade de carbonatação média que quando analisados, evidenciam a não formação do carbonato de cálcio aos 28 dias, para todos os traços ensaiados. Já para a idade de 91 dias, fez-se presente, independente do traço, uma película delgada de carbonato de cálcio em todo o perímetro dos corpos de prova submetidos ao ensaio. O Quadro 5 ilustra, de modo geral, o comportamento de cada concreto perante a aplicação de fenolftaleína em sua superfície interna.

Quadro 5. Aplicação de fenolftaleína na superfície dos corpos de prova.



O Quadro 5 possibilita visualizar que superficialmente, todos os traços produzidos se encontravam alcalinos, devido à coloração predominantemente rosada. Ainda, mesmo que para os 91 dias tenha ocorrido a reação química em questão, não seria possível o registro fotográfico da película carbonatada, em razão de a fenolftaleína fluir rapidamente para as bordas da superfície dos corpos de prova.

Destaca-se que a carbonatação se sucedeu com menor intensidade pelo fato de os corpos de prova permanecerem em ambiente de câmara seca e não expostos à ambientes urbanos e/ou industriais, como abordado pela NBR 12655:2015 para a classe de agressividade ambiental III. Desse modo, o ambiente laboratorial não foi capaz de reproduzir de forma equivalente as emissões e a possível penetração de CO₂ no concreto.

CONCLUSÃO

A partir do ensaio de tração por compressão diametral aos 28 dias foi possível compreender que o Concreto 01 se mostrou superior numericamente aos demais traços, seguido pelo Concreto 03, pelo concreto Referência e pelo Concreto 02. Todavia, todos os traços produzidos, sem exceções, não diferem significativamente entre si, ou seja, são considerados estatisticamente iguais no que tange a esta propriedade.

Quanto aos ensaios relacionados à durabilidade do concreto, a profundidade de carbonatação obtida foi praticamente nula perante as condições de exposição dos corpos de prova.

De modo geral, pode-se concluir que a inserção do pó de pedra na mistura por meio da técnica do empacotamento de agregados não influenciou negativamente o resultado dos ensaios aqui apresentados. Dessa forma, constata-se que o pó de pedra é um material apto tecnicamente a ser incorporado em misturas de concreto sem que haja perda de resistência mecânica.

Salienta-se que apesar de o empacotamento de agregados carecer de maior área para estocagem e controle periódico dos materiais, a técnica em questão se torna válida, uma vez que, traz benefícios de caráter ambiental, econômico e social.

REFERÊNCIAS

- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR NM 45: Agregados – Determinação da massa unitária e do volume de vazios. Rio de Janeiro, 2006.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 6118: Projeto de estruturas de concreto – Procedimento. Rio de Janeiro, 2014.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 7222: Concreto e argamassa – Determinação da resistência à tração por compressão diametral de corpos de prova cilíndricos. Rio de Janeiro, 2011.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 12655: Concreto de cimento Portland – Preparo, controle, recebimento e aceitação – Procedimento. Rio de Janeiro, 2015.
- KANNAN, D. M. et al. High performance concrete incorporating ceramic waste powder as large partial replacement of Portland cement. *Construction and Building Materials*, n. 144. 2017, p. 35-41.
- MEHTA, P. K.; MONTEIRO, P. J. M. Concreto: Microestrutura, propriedades e materiais. 2. ed. São Paulo: Pini, 2014.
- NANNI, L. F. Análise estatística de dados com uso de técnicas computacionais. 1986. Curso de Pós-graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 1986.
- TUTIKIAN, B. F. Proposição de um método de dosagem experimental para concretos auto-adensáveis. 2007. 162 f. Tese (Doutorado) – Curso de Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2007.