

Concreto celular com Ecofiler de resíduos de mármore e granito

Lightweight foamed concrete with Ecofiller of marble and granite wastes

Fábio Conrado de Queiróz

Bolsista Capacitação Institucional, Tecnologia Hab., MSc.

Nuria Fernández Castro

Supervisora, Engenheira de Minas, M. Sc.

Resumo

O CETEM desenvolve pesquisa de cooperação técnica com o Instituto Internacional do Mármore (IS.I.M), da Itália, visando ao aproveitamento de resíduos da lavra e industrialização das rochas ornamentais, valorizando-os como novos produtos e com o objetivo final do resíduo zero para o setor do mármore e granito. Nesse âmbito, o presente estudo consiste em desenvolver formulações de concreto celular espumoso com ecofiler de resíduo do beneficiamento das rochas para a produção de pré-moldados. O concreto celular é mais leve que o convencional, pois tem uma matriz porosa gerada com bolhas de ar, mas tem resistência para diversas aplicações. Foram elaborados cinco traços de densidades de 400 a 1700 kg/m³, com resíduos de granitos e de mármore coletados em aterros de Cachoeiro de Itapemirim - ES, cimento CPIII 40RS e aditivo antirretração. Para quatro dos traços obtiveram-se resistências à compressão superiores a 2,5 MPa, mínimo para muros e paredes. O estudo está em andamento, também controlando a retração e ainda serão avaliadas outras propriedades como porosidade e absorção de água, condutividade térmica, resistência ao arrancamento e outros.

Palavras chave: concreto celular, resíduos de rochas, concreto com espuma.

Abstract

This work is part of an international cooperation research of CETEM and the International Marble Institute (IS.IM), Italy, aiming at the recovery of the natural stones' processing wastes, with the ultimate goal of zero waste for the marble and granite sector. In this context, the present study consists in the development of foamed lightweight concrete formulations with stones wastes as eco-filler for the production of precast. Lightweight concrete is less dense than conventional because it has a porous matrix generated with air bubbles, but has resistance for many applications. Five mixes of densities from 400 to 1700 kg/m³ were produced, with granite and marble residues collected in landfills of Cachoeiro de Itapemirim - ES, CPIII 40RS cement and anti - shrinkage additive. For four of the samples, compressive strengths greater than 2.5 MPa were obtained, minimum for walls and other nonstructural uses. The research is in progress, with the analysis of compressive strength and shrinkage. Other properties such as porosity and water absorption, thermal conductivity, pullout resistance will be evaluated.

Key words: cellular mortar, rock waste, foamed mortar.

1. Introdução

O aproveitamento dos resíduos é, hoje, o foco principal do modelo de Economia Circular sendo adotado no mundo, um desafio urgente na busca pelo desenvolvimento sustentável, e tanto empresas quanto instituições de pesquisa, como o CETEM, estão empenhadas em encontrar soluções técnicas para superá-lo. Para as empresas de mineração, grandes geradoras de resíduos, o desafio é também uma oportunidade de gerar renda, transformando seus resíduos em coprodutos ou matérias primas secundárias, além de valorizar sua marca no mercado consumidor. O setor de rochas ornamentais produz muitos resíduos, tanto nas pedreiras, devido à baixa recuperação (relação estéril/bloco comercial menor que 25%) quanto nos processos de beneficiamento. No desdobramento de blocos em chapas, ao redor de 30% do volume é transformado em resíduo fino, produzindo em torno de 20,5 kg de resíduo por metro quadrado serrado, e na etapa de polimento, em torno de 3 kg/m², de acordo às nossas estimativas. Considerando que em 2018 foram processados no país 86,7 Mm² (ABIROCHAS, 2019), a geração de resíduos finos desse setor da mineração foi de 2 Mt. Trata-se de materiais de granulometria muito fina, com mais de 80% < 75 µm, conforme análises de resíduos de 14 aterros diferentes (SPALA *et al.*, 2017) com composição química variada, em função do material serrado mas, basicamente, compostos de pó de rocha podendo ter contribuição de algum insumo da produção. Os finos do beneficiamento são depositados nas próprias empresas (Classe II B, conforme NBR 10004:2004) ou em aterros licenciados pelos órgãos ambientais (Classes II A e II B, conforme NBR 10004:2004). O Estado do Espírito Santo, principal produtor e exportador de mármore e granitos comerciais do país, conta com mais de 40 desses aterros (QUEIROZ; CASTRO, 2018).

Devido à sua e sua finura e sua composição mineral, estudos para seu aproveitamento em produtos para a construção civil são inúmeros, vide Bastos e outros (2013) e Queiróz e Castro (2018). Com o objetivo de reduzir a exploração de matérias primas não renováveis, desenvolver novos materiais e diminuir a pegada ecológica da indústria do cimento, muitos dos estudos focam sua utilização na produção de cimento ou de produtos de base cimentícia tendo se demonstrado a viabilidade técnica do uso de resíduos finos da produção de rochas ornamentais como filers em concreto ou argamassas. Mashaly e outros (2018) verificaram que a substituição de até 20% do cimento por resíduos finos de granito, embora apresentando uma ligeira redução da resistência da pasta cimentícia, melhora a resistência à abrasão, aos efeitos de congelamento/degelo e ao ataque de sulfatos. Medina e outros (2017) afirmam que o resíduo de granito pode se constituir em uma adição ecológica para produtos de base de cimento por apresentar atividade pozolânica e verificaram que resíduos com 66,3% em peso de SiO₂ e superfície específica de 1,35 m²/g apresentaram maior atividade pozolânica que as cinzas volantes, devido à composição aluminossilicática.

David e outros (2016) estudaram o efeito de diversos filers minerais para a produção de ecoconcreto e chegaram à conclusão de que o filer diminuiu a porosidade do concreto, aumentando a durabilidade, e que o aumento da resistência à compressão se deve à finura do filer e não à sua composição. O estudo anterior evoluiu, para uma metodologia de desenho de concretos ecológicos com cimento portland comum e filers minerais, em função da granulometria desses filers e, utilizando a ferramenta de Avaliação de Ciclo de Vida, chegou-se ao conteúdo de filer ótimo entre 20 e 40% (JUHART *et al.*, 2019). No Brasil, a ferramenta de ACV também foi usada para comparar o

impacto ambiental da produção de areia, de argila, de filer comercial e resíduos de rochas ornamentais de aterros do Espírito Santo, chegando à conclusão de que a reciclagem dos finos de rochas ornamentais apresenta o menor impacto ambiental, dentre esses produtos, embora, se o resíduo exigir secagem prévia com grande consumo energético, dependendo da distância de transporte até o local de consumo, seu impacto pode ser maior que o da extração de areia (REBELLO, 2017).

Sendo a distância um gargalo para o aproveitamento dos resíduos, uma solução é buscar sua utilização em produtos mais valorizados e outra, elaborar no local de geração dos resíduos, o produto comercial final. Produtos valorizados hoje são os concretos leves e celulares, concretos com menor massa específica que os convencionais mas com boa performance. Os concretos leves se utilizam de agregados de baixa densidade para reduzir a massa específica mantendo o volume, efeito que, nos concretos celulares, sem agregados graúdos, é obtido mediante bolhas de ar incorporadas mecanica ou quimicamente, homoganeamente distribuídas e estáveis (SILVA, 2015). Além de ter a vantagem de menor peso próprio, quando produzido pré-moldado, facilita o manuseio e transporte, reduz as cargas atuantes na fundação e tem baixa condutividade térmica. Segundo Vasilakakis e outros (2011), seu origem se remonta a 1877, quando Zernikov, produziu uma mistura de cálcio e areia com vapor a alta pressão, embora pouco sólida. Em 1914, Aylsworth e Dyers ativam a argamassa de cálcio e areia com pó de zinco ou alumínio, obtendo a patente do produto denominado "rocha porosa artificial". Depois da primeira guerra mundial, que levou à escassez de recursos e energia, na Europa foram promovidas pesquisas na busca de materiais de construção que fossem isolantes térmicos e de baixo custo e, em 1924, o cientista sueco A. Eriksson desenvolveu a base para a produção do concreto celular autoclavado, iniciando-se sua produção industrial em 1929. O número de plantas industriais cresceu muito durante os anos de 1930 e, embora a Segunda Guerra Mundial ralentizou sua expansão, a produção de concreto celular autoclavado, entre 1929 e 1975, aumentou mais de 4.200 vezes no mundo. A partir daí o desenvolvimento continuou com variações na composição e produtos comerciais e marcas diversos, como o concreto com argila expandida como agregado leve (LECA). Desde 2013, o *Istituto Internazionale del Marmo* - I.S.I.M., em parceria com o grupo Bunker Tek.Sp.Ed, vem desenvolvendo, dentre outros produtos para a construção, concreto celular com agente espumante e incorporando diversos tipos de resíduos, tendo obtido sucesso na incorporação de até 100 kg/m³ de ecofíler de rochas ornamentais. O grupo desenvolveu também equipamentos para a produção e bombeamento em obra (BUONANNO *et al.*, 2016).

O CETEM, em parceria com o I.S.I.M., busca comprovar no Brasil a utilização dos resíduos finos do beneficiamento das rochas ornamentais (Ecofíler) em diversos produtos, principalmente inovadores e de maior valor. Em uma etapa anterior, junto com a Associação Brasileira de Cimento Portland – ABCP, que continua o estudo, já se obtiveram bons resultados com Concreto Celular Autoadensável com 50 e 100 kg/m³ de resíduo e verificou-se que não se desenvolviam reações álcali agregado com resíduos silicáticos nem carbonáticos (QUEIRÓZ; CASTRO, 2018).

2. Objetivo

O objetivo deste estudo é o obter os melhores traços e metodologia de produção de concreto celular para pré-moldados, com filer de resíduos do beneficiamento de mármore e granito – ecofíler.

3. Material e Métodos

O concreto celular em estudo é do tipo espumoso, no qual se introduzem bolhas na pasta cimentícia adicionando espuma obtida insuflando ar a pressão dentro de uma mistura fluida composta de água e um agente espumante. Para a produção da espuma foi utilizado o gerador da marca Bunker modelo G100 AC e agente espumante da marca Laston, ambos da Itália. Foram elaborados 5 traços considerados válidos pelas propriedades em estado fresco, nos quais foram utilizados cimento CP III-40RS da marca MIZU e dois tipos de resíduos finos do beneficiamento de rochas ornamentais, coletados em aterros de Cachoeiro de Itapemirim -ES: dois de materiais misturados, de composição silicática (MIX 430 e 441) e um de mármore (MAR 600/2). Às misturas adicionou-se um aditivo expansivo, a base de óxido de cálcio (Dry 1, da Chimica Edile) com a finalidade de reduzir a retração comum neste tipo de concreto, pela evaporação de água e por ter uma matriz porosa e deformável (BUONNANO et al., 2016). Toda água utilizada no trabalho é proveniente da rede de abastecimento do CETEM de Cachoeiro de Itapemirim e as misturas foram elaboradas em uma betoneira de capacidade de 120 l de fabricação nacional.

Os resíduos foram caracterizados em um granulômetro laser modelo Mastersizer 2000, da marca Malvern, e a densidade foi determinada por picnometria, no NRES. A composição química foi determinada por FRX, em espectrômetro WDS-2, modelo AXIOS, da marca Panalytical, e a composição mineralógica por DRX pelo método do pó, em equipamento Bruker D4 Endeavour, com software Bruker AXS Diffrac Plus, na Coordenação de Análises Minerais – COAMI do CETEM.

Para se chegar à consistência ideal da espuma, densa e estável para ser efetiva na formação de poros homogêneos na pasta, foi necessário realizar diversos testes e ajustes sobre a quantidade de agente espumante, a pressão do ar e a vazão de água. O procedimento geral da mistura na betoneira foi adicionar primeiro o resíduo e umidificá-lo para evitar o consumo da água do cimento, dificultando a trabalhabilidade da pasta e, a seguir, o cimento, o aditivo e a água. Por último foi adicionada a espuma. Após poucos minutos foi analisado o abatimento com o cone de Hagemann (entre 18 e 24 cm), e medida a densidade em estado fresco.

A cura é feita no ambiente, cobrindo os corpos-de-prova com um filme plástico para evitar evaporação excessiva. As amostras são desenformadas entre sete e dez dias da elaboração. Para cada traço, foram formados 8 corpos de prova para ensaios de resistência à compressão segundo a ABNT NBR 5739, dois para ensaio de retração conforme a norma UNI 11307:2008, a fim de comparar os resultados com aqueles obtidos na Itália e dois corpos de prova para o ensaio de retração, de acordo com a norma americana, ASTM C157, utilizada no Brasil.

4. Resultado

As tabelas 1 e 2 mostram os resultados da caracterização dos resíduos utilizados. Observa-se a granulometria muito fina, próxima à do cimento C-III (BACARJI, 2013), o que indica sua aplicabilidade como filler em termos de granulometria, por ter tamanho suficiente para preencher vazios, melhorando a resistência e trabalhabilidade.

Tabela 1. Características físicas dos resíduos.

	d_{10} (μm)	d_{50} (μm)	d_{90} (μm)	Superfície Específica (m^2/g)	Densidade (g/cm^3)
MIX 430	2,607	24,824	102,73	0,87	2,773
MIX 441	2,474	20,952	90,228	0,90	2,624
MAR 600/2	2,228	18,214	73,839	1,06	2,831

Tabela 2. Composição química de todos os resíduos.

Amostra	Composição química (% de óxidos)										
	Na ₂ O	MgO	Al ₂ O ₃	SiO ₂	P ₂ O ₅	SO ₃	K ₂ O	CaO	TiO ₂	Fe ₂ O ₃	PPC
MIX 430	3,5	1,6	16,5	61,5	0,38	0,11	3,6	3,4	0,7	7,1	1,2
MIX 441	4,4	1,6	19,4	59,3	0,37		4,6	3,6	0,77	4	1,1
MAR 600/2	0,16	21,10	0,60	5,80	< 0,1	< 0,1	< 0,1	29,10	< 0,1	0,12	42,70

Após diversas tentativas no gerador de espuma, foi possível chegar à configuração ideal para se obter a densidade entre 78 e 80 kg/m³ utilizando 3% de agente espumante e uma vazão de água de 550 l/h, e com 92% de ar e 8% de água. A etapa da adequada formação da espuma é muito delicada já que além da estabilidade necessária, também se deve garantir a homogeneidade e esfericidade dos poros resultantes no concreto.

Na preparação dos diversos traços, verificou-se que a ordem da colocação dos componentes, o tempo de betoneira e, principalmente a quantidade de água utilizada, afetam muito o resultado. Conseguiu-se obter cinco traços, sem utilização de agregados miúdos, apenas com ecofíler, cimento, aditivo, espuma e água. A Tabela 3 mostra algumas características dos concretos produzidos. Por se tratar de um mix inovador, com grande quantidade de resíduo, a formulação não é detalhada aqui e ainda deve sofrer variações, em função dos resultados.

Tabela 3. Características das pastas produzidas.

Traço	Massa unitária (kg/m^3)	Slump (cm)	Resíduo	Qtde. resíduo (kg/m^3)
1	430	22	MAR 600/2	215
2	794	19	MAR 600/2	197
3	923	19	MAR 600/2	216
4	1.765	19	MIX 427/3	197
5	1.095	22	MIX 427/3	153

O traço 1 resultou muito leve e, como podia se esperar, a resistência à compressão a 8, 14, 21 e 28 dias foi muito baixa (em torno a 0,5 MPa). A mistura estava muito fluida e, provavelmente deveria se esperar mais para desenformá-la. A relação a/c no concreto celular é mais alta que a dos concretos convencionais e, sendo sua cura no ambiente, precisam de mais tempo para desenformar. O traço 2 já apresentou melhores resultados com resistência à compressão aumentando de 1,5 MPa a 7 dias para 2,59 a 28 dias. O traço 3 iniciou com 2,38 MPa a 7 dias e chegou a 3,10 MPa a 14 dias. O traço 4, com resíduos de granito, resultou excessivamente denso

para o procurado (concreto celular de 800-1000 kg/m³ com boa resistência para diversas aplicações como muros e paredes, mas não para aplicações estruturais ou de alto desempenho) e a resistência à compressão a 7 dias foi de 10 MPa. Durante a produção houve aglomeração o que dificultou a trabalhabilidade e a espuma perdeu consistência na mistura. Já o traço 5, também com resíduos de granito, apresentou uma boa consistência e massa específica adequada, mas ainda estava em cura quando da elaboração deste artigo. Os resultados até aqui demonstram que, obviamente, quanto maior for a massa unitária do concreto celular, menor a porosidade e maior será a resistência à compressão uniaxial.

Quanto à retração, pela adaptação do método italiano, tanto o Traço 1 quanto o Traço 2, apresentaram 0,058% e 0,048% de retração após 28 e 31 dias respectivamente, confirmando os resultados obtidos pelo IS.I.M. para o uso de resíduos de mármore como Ecofler de concreto celular, curado no ambiente e com filme plástico e condizentes com os encontrados por Tezuka (1989), de 0,038% e Nambiar (2009), de entre 0,07% e 0,09% para concretos celulares espumosos. A efetividade do agente expansivo utilizado só poderá ser comprovada ao se comparar com uma mistura sem esse aditivo. Os resultados de retração, de acordo à norma C157 resultaram em 0,126% para o Traço 1 aos 32 dias e 0,2% para o Traço 2 aos 31 dias. Os valores de retração obtidos por este método resultaram elevados e divergentes com os calculados pelo método anterior, com o qual este assunto deve ser melhor investigado.

Os resultados apresentados até o momento não são conclusivos da viabilidade de uso de grande quantidade de resíduos de mármore e granito, como ecoflers de concreto celular, e o estudo continua com a avaliação da resistência à compressão e o monitoramento da retração na secagem, com as amostras produzidas. Serão avaliados ainda, a absorção de água e o sistema poroso por microscopia eletrônica, a condutividade térmica, a resistência ao arrancamento e, se possível, a determinação do módulo de elasticidade. Observou-se que o concreto celular com espuma é bastante sensível durante seu processo de produção. A densidade da espuma é fundamental para que se obtenha a consistência de “mousse” desejada que garanta a estabilidade e homogeneidade das bolhas na pasta. A ordem da inserção dos componentes da mistura e o tempo de produção também parecem influenciar no produto final. Os resíduos devem ser bem umidificados antes de adicionar o cimento sob perigo de se produzirem grumos dificultando a trabalhabilidade da massa, mas água em excesso, torna a pasta muito fluida. A formulação da mistura deve ser cuidadosa e considerando nos cálculos a água que está incorporada na espuma.

5. Agradecimento

Ao CNPq pela bolsa concedida, ao CETEM/NRES, ao Paolo Marone do Istituto Internazionale del Marmo e a Paschoale e Andrea de Bunker, a ABCP e aos aterros pelo fornecimento dos resíduos e demais informações. Agradeço o auxílio dos colegas do NRES, Carlos Eduardo Vandermurem e a Leonardo Cattabriga na elaboração deste trabalho.

6. Referências Bibliográficas

ABIROCHAS – Associação Brasileira da Indústria de Rochas Ornamentais. **Balço das Exportações e Importações Brasileiras de Rochas Ornamentais em 2018**. Informe 01/2019. 17 pp. 2019.

AYLSWORTH, Jonas W.; DYER, Frank L **Porous artificial stone and its production**. US patent 1087098A. 17 Fev, 1914.

BACARJI, E., TOLEDO FILHO, R.D., KOENDERS, E.A.B., FIGUEIREDO, E P., LOPES, J.L.M.P. Sustainability perspective of marble and granite residues as concrete fillers. **Construction and Building Materials** 45 (2013) pp 1 -10. Elsevier Ltd. <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2013.03.032>

BASTOS, R.S.; ULIANA, J.G; CALMON, J.L; TRISTAO, F.A; VIEIRA, G.K. Revisão bibliográfica dos estudos sobre a aplicação da lama do beneficiamento de rochas ornamentais na produção de materiais de construção. In: 55º Congresso Brasileiro do Concreto. CBC 2013, Gramado - RS. In: **...Anais**. São Paulo: Instituto Brasileiro do Concreto - IBRACON, 2013. v.1. p.1-16.

BUONANNO P.; D'AMORE M.; MARONE P. Manuale Tecnico da Cantiere: Risultati della Ricerca Applicata su CLC & MLC - Cementi Leggeri Cellulari & Malte Leggere Cellulari. 2016. Bunker Tek Sped. IS.I.M, 69 pp.

DAVID GA, JUHART J, KRISCHEY E, MITTERMAYR F, KRÜGER M. Eco-concrete for precast elements with effective mineral micro-and eco-fillers. In **Concrete with Supplementary Cementitious materials**. 2016.

JUHART, J. et al. Functional and environmental performance optimization of Portland cement-based materials by combined mineral fillers. **Cement and Concrete Research**, v. 122, p. 157–178, 1 ago. 2019.

MASHALY A.O.; SHALABY B.N.; RASHWAN M.A. Performance of mortar and concrete incorporating granite sludge as cement replacement, **Construction and Building Materials**, v. 169, 2018, Pages 800-818, ISSN 0950-0618, <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.03.046>.

MEDINA G.; SÁEZ DEL BOSQUE I.F.; FRÍAS M.; SÁNCHEZ DE ROJAS M.I.; MEDINA, C. Energy performance and calorimetric behaviour of cements bearing granite sludge, **Powder Technology**, Volume 356, 2019, pages 517-527, ISSN 0032-5910, <https://doi.org/10.1016/j.powtec.2019.08.080>.

NAMBIAR, E.K.K.; RAMAMURTHY, K. Shrinkage Behavior of Foam Concrete. **Journal of Materials in Civil Engineering**, v. 21, n. 11, p. 631–636, nov. 2009.

QUEIRÓZ, F.C., CASTRO, N.F. Utilização de resíduos de rochas ornamentais como Ecofiler de concreto autodensável. In: Jornada do Programa de Capacitação Interna do CETEM, 7. Rio de Janeiro, Anais...Rio de Janeiro: CETEM/MCTIC, 2018.

REBELLO, T.A. Avaliação do ciclo de vida do processamento de lama do beneficiamento de rochas ornamentais: um estudo comparativo com areia, argila e filer. 2019. 138 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Engenharia Ambiental) Centro Tecnológico da Universidade Federal do Espírito Santo – UFES, Vitória, 2019.

SPALA, S.T.; CASTRO, N.F.; FREIRE, L.C. Caracterização tecnológica de resíduos de beneficiamento de rochas ornamentais para seu uso em concreto. In: Jornada De Iniciação Científica, 25. Rio de Janeiro: CETEM/MCTIC, 2017. 5p.

SILVA, C.A. de O. Estudo de dosagem e avaliação de concreto celular com fins estruturais. 2015. 137 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil: Estruturas) – Centro de Tecnologia, Programa de Pós Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal de Alagoas, Maceió, 2015.

TEZUKA, Y. Concretos Especiais. In: Simpósio de desempenho de materiais e componentes de construção civil, 2. 1989, Florianópolis. Anais...1989. p. 182-194.

VASILAKAKIS, D., EDELMANN, F.T., & MORL, L. (2011). Die Herstellung und Charakterisierung von Kupfer-Chrom- und Titanoxidkatalysatoren auf Basis Porenbeton zur katalytischen Nachverbrennung von flüchtigen organischen Stoffen. Tese Doutorado. Fakultät für Verfahrens- und Systemtechnik. Otto-von-Guericke-Universität Magdeburg.