

# **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, Engenharia de Minas, M. Sc.

### **Resumo**

Apresentam-se os resultados experimentais da produção de cinco novos traços de concreto celular espumoso com 50% do peso de sólidos constituído de resíduos finos da produção de rochas ornamentais. (mármore e granitos) com base em resultados de cinco produzidos anteriormente. As características de dois concretos, com resíduos diferentes, resultaram próximas às buscadas, mas os dez concretos produzidos são aceitáveis no que tange à resistência, capilaridade, absorção de água e retração, podendo ainda se melhorar a resistência a compressão. No entanto para uma mesma formulação obtiveram-se concretos diferentes, com amplo intervalo massas específicas o que corrobora a sensibilidade do produto final ao processo de produção. Também obtiveram-se, para uma única mistura, corpos de prova de densidades heterogêneas, o que indica possibilidade de segregação na pasta e que deve ser melhor investigado.

**Palavras chave:** concreto celular espumoso, resíduos, rochas ornamentais.

### **Abstract**

This paper describes the experimental results of the production of five new lightweight foamed concrete mixes, based on the results of five previously produced, with 50% of the weight of solids consisting of fine residues from the production of natural stones (marble and granite). The characteristics of two of the produced concrete, with different residues, are close to those sought, but the ten mixes are acceptable in terms of resistance, capillarity, water absorption and shrinkage, though uniaxial strength could be improved. However, for the same formulation, different concrete was obtained, with a wide range of densities, which corroborates the sensitivity of the final product to the production process. Samples of heterogeneous densities were also obtained for a single mixture, which indicates the possibility of segregation within the paste, and which should be further investigated.

**Key words:** lightweight foamed concrete; wastes, natural stones.

## 1. Introdução

Dentre os diversos tipos existentes, o concreto leve, de massa específica inferior ao concreto comum vem ampliando seu uso na construção pelas evidentes vantagens de redução de custos em estruturas e em manuseio e transporte. Quanto mais leve, menor resistência apresentará, mas essa diminuição de resistência não compromete sua utilização se as solicitações em obra não forem grandes, motivo pelo qual é muito usado em alvenarias não estruturais. O concreto celular espumoso é um tipo de concreto leve, no qual, adicionando-se espuma à pasta cimentícia, incorporam-se bolhas de ar isoladas que agem como agregados de densidade zero. Assim obtém-se um concreto de baixa densidade, fluido, que pode ser bombeado e tem propriedades isolantes. Pode ser produzido em densidades de 300 a 1.900 kg/m<sup>3</sup> em função da utilização prevista. Uma utilização cada vez mais estendida no Brasil é o uso de blocos pré-moldados ou moldados in loco, para a construção de habitações populares e cada vez é maior o uso de concretos celulares estruturais (1.400 a 2.000 kg/m<sup>3</sup>) que apresentam resistências compatíveis com essas funções (BARBAR, 2016). Diversos materiais (inertes colaborativos ou reativos) são incorporados no concreto buscando reduzir custos de produção e modificar as propriedades mecânicas, ou aproveitar diversos tipos de resíduos. São constituídos de material solto e com granulometria variável de até 3 mm. (BUONNANO et al.,2016). O uso de agregados mais finos aumenta a resistência do concreto celular o que se atribui à maior uniformidade e melhor distribuição das bolhas que quando se usa agregado mais grosso. Song e Lange (2019) comprovaram que para concretos celulares de baixa massa específica, é importante uma maior finura das partículas para melhorar suas propriedades. Por esse motivo, o uso de fillers em substituição do cimento ou areia ou ambos melhora as propriedades do produto, em especial aqueles que apresentam atividade pozolânica como as cinzas volantes. Os resíduos finos da produção de rochas ornamentais têm sido analisados para seu uso em diferentes produtos de concreto: comum, autoadensável, de alto desempenho, reforçado, celular, e em elementos pré-moldados de baixa resistência. Esses estudos, em geral, demonstram que incorporação de até 20% desses finos, carbonáticos ou silicáticos, resulta tecnicamente viável e até melhora algumas propriedades do concreto, devido à sua finura, mas o uso em grandes quantidades aumenta a demanda de água na mistura e pode ser deletério (GALETAKIS; SOULTANA, 2019). Alguns estudos, porém, comprovam a eficiência dos resíduos de rochas ornamentais como fillers em maiores quantidades: Celik e outros (2014) substituíram até 55% do cimento com filler calcário, em concreto autoadensável, com bons resultados, e um estudo preliminar no CETEM produziu CCA com 67% de resíduos de mármore (QUEIROZ; CASTRO, 2018). A incorporação de 45% de resíduos da produção de calcário ornamental, substituindo agregados, em concreto de alta performance, reforçado com fibras, resultou na mais rápida hidratação do cimento e melhora na sua compacidade no estudo de Fares e outros (2020). Em particular, os resíduos oriundos de rochas silicáticas, apresentam-se interessantes pela sua composição, com alto conteúdo em sílica e alumina, que atenderia às características de materiais pozolânicos. No entanto, há controvérsia ainda quanto a sua atividade em pastas cimentícias: enquanto alguns autores afirmam que participam do processo de hidratação do cimento, aumentando o tempo de cura devido às suas propriedades pozolânicas (MEDINA et al., 2019), outros garantem que esse tipo de materiais não age ativamente no processo, sendo inerte e coadjuvante

na melhora de algumas características devido à sua finura (ALMADA et al., 2020). Sendo um dos grandes desafios do CETEM o aproveitamento dos resíduos da produção de rochas ornamentais, a proposta do presente estudo, iniciado em 2018, é conseguir, por meio de um acordo de cooperação com o *Istituto Internazionale del Marmo* - IS.I.M, reproduzir os resultados da Itália e outros países utilizando resíduos carbonáticos, na produção de eco-concreto celular espumoso, com os resíduos das rochas brasileiras, em sua maior parte silicáticos. Com o Mix design proposto, incorporando cerca de 200 kg/m<sup>3</sup> de resíduos finos, elimina-se o uso de areia e agregados e reduz-se a quantidade de cimento necessário (de 350 para 200 kg/m<sup>3</sup>) para produzir um concreto celular da mesma resistência. Alcançar este objetivo auxiliaria na redução de emissões de CO<sub>2</sub> da produção do cimento e na utilização em grande escala dos resíduos ainda não aproveitados.

## 2. Objetivos

O objetivo geral desta pesquisa é formular misturas de concreto celular espumoso passíveis de utilização na indústria da construção incorporando alta carga de resíduos finos da produção de rochas ornamentais,

Especificamente, neste trabalho, buscou-se aprimorar o processo experimental de produção de concreto celular espumoso e avaliar as propriedades de cinco novos traços produzidos com resíduos finos do beneficiamento de mármore e granitos (LBRO) e relação filer/cimento aproximada de 1.

## 3. Material e Métodos

Foram produzidos, no Núcleo Regional do Espírito Santo do CETEM, cinco novos traços de concreto celular espumoso utilizando-se um gerador de espuma da marca Bunker modelo G100 AC e agente espumante da marca Laston, ambos da Itália. Para a pasta cimentícia utilizou-se cimento CP III-40RS da marca MIZU e quatro tipos de resíduos, três de materiais misturados, de composição silicática (MIX 425, MIX 440 e MIX 441) e um de mármore (MAR 600/2). A caracterização dos resíduos encontra-se em Queiróz e Castro (2018; 2019). Às misturas adicionou-se um aditivo expansivo (Dry 1, da Chimica Edile) para se controlar a retração na secagem e água da rede de abastecimento de Cachoeiro de Itapemirim. As misturas foram elaboradas seguindo as quantidades sugeridas pelo IS.I.M, buscando obter concreto celular de massa específica de 800 kg/m<sup>3</sup>, sendo necessário realizar ajustes nas quantidades utilizadas em função da consistência observada no momento da produção. Por se tratar de resíduos heterogêneos, seu comportamento na mistura foi diferente em cada caso, como também observaram Almada e outros (2020). A sequência básica foi adicionar parte da água aos resíduos na betoneira, para evitar que consumissem água necessária ao cimento. Uma vez umedificados, adicionaram-se o cimento, o aditivo e a água e após alguns minutos, a espuma. Continuou-se misturando tudo observando-se visualmente a homogeneidade da pasta e controlando o espalhamento. Fizeram-se alguns ajustes até chegar à consistência desejada e um espalhamento de 18 a 22 cm e quando obtidas, mediu-se a densidade da massa fresca e moldaram-se os corpos de prova para ensaios de resistência à compressão (ABNT NBR 5739), retração (melhoramento da norma UNI 11307), e retração, (ASTM C157). A cura foi feita no ar, mas cobrindo os corpos de prova com um plástico e foram desenformados a partir do sexto dia, quando se iniciaram as medições

de retração na usina piloto do NRES. A resistência à compressão a 7, 14, 21 e 28 dias foi realizada no laboratório da empresa Minerasul. Para a maioria dos traços elaborados neste trabalho e no anterior foram realizados ainda o ensaio de absorção de água por capilaridade (EN 1925:1999) e o teste rápido de absorção de água (EN 1609 – Método B), e realizadas medições de velocidade de pulso ultrassônico, no Laboratório de Alterabilidade e Conservação de Materiais de Construção – LACON, do CETEM-RJ.

#### 4. Resultados e Discussão

Os resultados obtidos para todos os traços produzidos encontram-se sumarizados na Tabela 1. Não havia disponibilidade de corpos de prova de todos os traços, motivo da falta de resultados para alguns traços/ensaios, com exceção da medição de VPU nos traços 1 e 5 que não foi possível devido a alta porosidade (NP).

Tabela 1. Composição e características dos concretos produzidos.

Composição (m3)	Traço 1	Traço 2	Traço 3	Traço 4	Traço 5	Traço 6	Traço 7	Traço 8	Traço 9	Traço 10
Tipo de resíduo	420/2	420/2	420/2	427/3	427/3	441	425	440	440	600/2
Cimento (kg)	196,49	196,69	216,70	197,20	197,20	229,65	238,14	214,78	213,69	211,24
Resíduo (kg)	216,13	196,69	216,70	197,20	197,20	229,65	238,14	178,99	213,69	240,05
Aditivo (kg)	3,93	3,93	3,94	3,94	3,94	3,83	3,66	3,58	3,17	4,61
Água (L)	149,33	155,39	140,55	149,87	149,87	145,44	176,52	217,65	123,94	151,71
Espuma (L)	707,35	708,09	709,18	709,90	709,90	688,94	659,48	644,35	728,14	691,34
<b>Características</b>										
a/c	0,78	0,81	0,67	0,78	0,79	0,65	0,76	1,03	0,61	0,74
Dens. Fresco (kg/m <sup>3</sup> )	440	813	944	1806	493	1118	1379	574	766	626
Espalhamento (cm)	22,00	19,00	19,00	19,00	20,00	22,00	19,00	22,00	17,00	19,00
Massa Esp. Seca (kg/m <sup>3</sup> )	429	862	898	1641	436	1111	1066	486	746	528
Consistência	1,97	1,07	0,92	0,48	1,76	0,78	0,63	1,51	1,13	1,38
Estabilidade	1,03	0,94	1,05	1,10	1,13	1,01	1,29	1,18	1,03	1,19
fc (Mpa - 28 dias)	0,49	2,57	4,61	19,64	0,81	3,65	5,40	1,57	1,35	0,93
Coef. Capilaridade (gr.cm <sup>-2</sup> .s <sup>-1/2</sup> )	0,0069		0,0010	0,0013	0,0064		0,0026	0,0012	0,0049	0,0019
Absorção de água (teste rápido)	29,5%		2,0%	1,1%	27,2%		0,9%	3,1%	3,5%	3,6%
Vel. Pulso Ultrassônico VPU (m/s)	NP		2733	6159	NP		2503	1744	1536	1472
Retração ASTM (strain - μm/m)	2100	3667	2000			2500	2467	4067	2267	3067
Retração Dupla (strain - μm/m)		2000	1400		4800	2200	3800	4000	2300	3400

Os códigos dos resíduos utilizados na Tabela 1 correspondem a resíduos de mármore (420/2 e 600/2) e de mistura de diversos materiais, com maior proporção de rochas silicáticas (425, 427/3, 440, 441). O principal resultado obtido é a corroboração da sensibilidade do concreto celular espumoso ao processo produtivo (QUEIRÒZ; CASTRO, 2019), pois mesmo seguindo-se um traço fixo a consistência (relação massa específica fresca obtida / massa específica fresca visada) chegou-se a afastar muito de 1, que seria o ideal (RAMAMURTHY, 2009) resultando em densidades de 439 a 1806 kg/m<sup>3</sup>, amplitude fora da tolerância para este

tipo de materiais de, aproximadamente,  $110 \text{ kg/m}^3$  (BUONANO et al. , 2016). De acordo com Barbar (2016) e Lermen (2019) diversos fatores afetam às características do concreto celular espumoso, sendo um dos mais importantes a quantidade e qualidade da espuma incorporada, mas também o tipo de filer, de cimento e os aditivos. Normalmente, mantem-se um valor fixo de água e cimento (entre 0,4 e 0,6) e aumenta-se a densidade aumentando a carga de areia e diminuindo a quantidade de espuma. Se a mistura contiver pouca água, perde fluidez e trabalhabilidade e se a água estiver em excesso, a espuma não se mantém estável e a mistura segrega, mas alguns estudos apresentam relações de 0,4 a 1,25 (RAMAMURTHY, 2009). Neste estudo em que se utiliza filer (80% < 74 micrómetros), a mistura requer mais água para que esse filer possa ser trabalhado. Por isso, optou-se por umidificar o resíduo antes de misturá-lo com o cimento, permitindo a adequada hidratação deste último. Isso resultou em uma relação a/c superior à utilizada normalmente (de 0,61 a 1,03 incluindo a água incorporada na espuma).

Os valores de resistência à compressão obtidos encontram-se dentro do intervalo esperado em função da densidade final obtida (CONSTRUÇÃO CELULAR, 2020) mas ainda inferiores (traços próximos aos  $800 \text{ kg/m}^3$  almejados) ao obtido na Itália (3,05 MPa). O uso de cimentos tipo III ou IV, os mais comuns, diminui a resistência à compressão sensivelmente e aumenta o tempo para desformar (BUONANO et al., 2016). O traço 9 (1,35 MPa) apresentou grande variabilidade de densidades nas amostras, significando mistura pouco homogênea. Poderia se dever à própria composição dos resíduos ou à falta de estabilidade da espuma o que pode ter produzido a segregação da pasta. Existe uma relação direta entre a densidade e a resistência à compressão que continua aumentando após 28 dias, como observado no traço 1 que com valor a 43 dias de 0,92 MPa. Silva e outros (2018) obtiveram com um traço semelhante ao Traço 3 deste estudo, mas utilizando relação areia/cimento de 3 e água/cimento de 0,5, densidade de  $1.400 \text{ kg/m}^3$ , com resistência à compressão de 4,30 MPa a 28 dias e 4,85 a 56 dias. O Traço 3 aqui obtido apresentou resistência de 4,61 MPa com massa de  $900 \text{ kg/m}^3$  e o traço 7, uma resistência de 5,40 MPa com  $1.100 \text{ kg/m}^3$  de massa específica. A resistência de 19 MPa foi obtida pelos mesmos autores para uma massa específica de  $1.900 \text{ kg/m}^3$  o que aqui se conseguiu com 1.600. Isto indica que a substituição de areia por filer em concreto celular realmente melhora a resistência do produto.

A absorção de água por capilaridade, com exceção do Traço 1, resultou em valores semelhantes aos de Almada e outros (2020) para um concreto comum incorporando 20% de resíduos misturados de rochas ornamentais. Considerando que o concreto celular é muito mais poroso que o comum, este resultado é interessante indicando que as bolhas de ar não estão conectadas, embora seu tamanho, forma e distribuição devam ser mais bem analisadas para se chegar a traços e processos de produção mais estáveis utilizando os finos. Também é provável que o aditivo antirretração tenha tido efeito plastificante, diminuindo a absorção. Os testes rápidos de absorção também resultaram em valores baixos para este tipo de material.

Sem considerar o uso de filers, o fenômeno da retração no concreto diminui à medida que a densidade também o faz pois o conteúdo na pasta base, responsável pela retração é menor (RAMAMURTHY, 2009). No entanto, diversos estudos mostram que aditivos minerais utilizados como filers aumentam a retração (SONG, 2019). As amostras produzidas, mostraram, em alguns casos, uma expansão inicial, efeito do aditivo utilizado e

retração posterior, estabilizando em torno dos 2000-3000 mm/m próximo dos 100 dias. Os resultados pelos dois métodos de medição foram semelhantes. Nos testes realizados, não se observa relação entre densidades e retração, o que pode ter sido mascarado pelo uso do aditivo. Por último, os resultados de VPU comprovam a relação direta desse método não destrutivo com a resistência à compressão e a densidade, e valores condizentes com os obtidos pelos parceiros italianos.

Um melhor entendimento da amplitude de massas específicas obtidas pode se alcançar analisando-se a quantidade de ar incorporado nas misturas e a qualidade das bolhas de ar. Grande concentração de bolhas, próximas ou interconectadas produz diminuição da resistência à compressão (BARBAR, 2016). Yu e outros (2020) estudaram mediante análise de imagens as bolhas de amostras de diferentes densidades concluindo que, a densidade das bolhas e sua forma têm influência direta na resistência do concreto produzido. Quanto maior for a densidade das bolhas e menos esféricas sejam, menor e mais irregular será a espessura de matéria sólida entre elas e, conseqüentemente, menor a resistência, pois é a parte sólida a que carrega os esforços. Além disso, devem se fazer testes de segregação das pastas frescas em coluna e controlar as condições de umidade e temperatura na cura. Na continuação deste trabalho outras propriedades de durabilidade devem ser estudadas.

## **5. Conclusão**

Obtiveram-se dois traços com resultados adequados ao pretendido inicialmente, um com 50% de resíduo de mármore (Traço 3) e um com 50% de resíduo de granito (Traço 7) que indicam a viabilidade deste uso para os resíduos. Embora não se observem grandes diferenças por enquanto entre os dois tipos de resíduos quando às propriedades dos concretos produzidos, sim notou-se na prática uma maior dificuldade de se trabalhar a mistura com o resíduo de granito. Ainda há de se realizar mais ensaios de caracterização e durabilidade para se confirmar esta hipótese e verificar possíveis ajustes no processo de produção, como aumentar a densidade da espuma e verificar as melhores condições de cura para se melhorar a resistência e a homogeneidade da pasta, considerando que um possível uso seja a moldagem em locais de construção. Comparar com traços semelhantes sem aditivo antirretração também servirá para confirmar sua influência tanto na retração e na permeabilidade.

## **6. Agradecimentos**

Agradecemos aos Paolo Marone, do IS.I.M, ao Andrea e o Paschoale da Bunker pelo constante apoio e orientação e ao Riccardo Vanetti pelo fornecimento do aditivo e apoio. Aos colegas do CETEM, em especial ao Leonardo Cattabriga, o Flávio, o Luan e o Eduardo pela motivação e dedicação para recuperar o gerador de espuma.

## 7. Referências Bibliográficas

ALMADA, B.S. et al. Influence of the heterogeneity of waste from wet processing of ornamental stones on the performance of Portland cement composites. **Construction and Building Materials** 262 (2020) 120036.

BARBAR, Joseph Salem. **Influência do teor de ar incorporado no desempenho de concretos com diferentes teores de agregados**. 2016. 149 f. Tese (Doutorado em Arquitetura e Urbanismo – área de arquitetura, urbanismo e tecnologia) – Curso de Doutorado em Arquitetura, Urbanismo e Tecnologia. USP, Universidade de São Paulo, São Carlos.

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.

CELIK, K, JACKSON, M.D., MANCIO, M., MERAL, C, EMWAS, A.-H. MEHTA, P.K., MONTEIRO, P.J.M. High-volume natural volcanic pozzolan and limestone powder as partial replacements for Portland cement in self-compacting and sustainable concrete. **Cem. Concr. Compos.** 45 (2014) 136–147.

CONSTRUÇÃO CELULAR. **Planilha para cálculo de traços e custos**. 2020. Disponível em <http://construcaocelular.com.br/>. Acessado em 19/10/2020.

COPPOLA, B.; TULLIANI, J.; ANTONACI, P.; PALMERO, P. Role of Natural Stone Wastes and Minerals in the Alkali Activation Process: A Review. **Materials**, 2020, 13, 2284.

FARES, G., ALBAROUD, M. H., KHAN, M. I. Fine limestone dust from ornamental stone factories: a potential filler in the production of High-Performance Hybrid Fiber-reinforced Concrete. Em: **Construction and Building Materials**, Volume 262,2020,120009, ISSN 0950-0618, <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.120009>.

GALETAKIS, M.; SOULTANA, A. A review on the utilisation of quarry and ornamental stone industry fine by-products in the construction sector. **Constr. Build. Mater.** 2016, 102, 769–781.

LERMEN, R.T. et al. Effect of Additives, Cement Type, and Foam Amount on the Properties of Foamed Concrete Developed with Civil Construction Waste. **Appl. Sci.** 2019, 9, 2998; doi:10.3390/app9152998.

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>.

QUEIRÓZ, F. C., CASTRO, N. F. Concreto celular com Ecofiller de resíduos de mármore e granito. In: Jorn. do Programa de Capacitação Interna do CETEM, 8. Rio de Janeiro, **Anais...Rio de Janeiro: CETEM/MCTIC**, 2019.

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

RAMAMURTHY, K., NAMBIAR., E.K.K, INDU SIVARANJANI, G. A Classification of Studies on Properties of Foam Concrete. **Cement and concrete composites**, Volume 31, Issue 6, July 2009, 388-396.

SILVA, C.A.O.; GOMES, P.C.C.; CAMAUBA, T.M.G.V.; FALCÃO, V.B. Influência do aditivo espumígeno na dosagem e nas propriedades do concreto celular aerado. **Revista Matéria**, v.23, n.1, 2018.

SONG, Y.; LANGE, D. Crushing Performance of Ultra-Lightweight Foam Concrete with Fine Particle Inclusions. **Applied Sciences**, 2019, 9, 876; doi:10.3390/app9050876.

TIKALSKY PJ, POSPISIL J, MACDONALD W. A method for assessment of the freeze-thaw resistance of preformed foam cellular concrete. **Cement and Concrete Research** 2004; 34(5): 889-93.

VISAGIE M, KEARSELY EP. Properties of foamed concrete as influenced by air-void parameters. **Concrete/Beton** 2002; 101: 8-14.

YU, W.; LIANG, X.; NI, F. N.; OYEYI, A. G.; TIGHE, S. Characteristics of Lightweight Cellular Concrete and Effects on Mechanical Properties. **Materials**, 2020, 13, 2678.