

Utilização do Resíduo de Areia Verde de Fundição no Desenvolvimento de Concreto Espumígeno

Use of Foundry Green Sand Waste in Development of Foamed Concrete

Richard Thomas Lermen(1); Gian Bonatto(2); Rodrigo de Almeida Silva(3)

1 IMED - Faculdade Meridional, Passo Fundo, RS, Brasil.

E-mail: richard.lermen@gmail.com | ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2335-9481>

2 IMED - Faculdade Meridional, Passo Fundo, RS, Brasil.

E-mail: bonatto_G95@hotmail.com

3 IMED - Faculdade Meridional, Passo Fundo, RS, Brasil.

E-mail: rodrigo.silva@imed.edu.br

Revista de Arquitetura IMED, Passo Fundo, vol. 9, n. 1, p. 153-170, Janeiro-Junho, 2020 - ISSN 2318-1109

DOI: <https://doi.org/10.18256/2318-1109.2020.v9i1.3856>

Sistema de Avaliação: *Double Blind Review*

Editor-chefe: Grace Tibério Cardoso

Como citar este artigo / How to cite item: [clique aqui/click here!](#)

Resumo

O principal objetivo deste trabalho foi avaliar a substituição da areia natural pelo resíduo de areia verde de fundição na fabricação de concreto espumígeno. O projeto experimental foi constituído de dois fatores com diferentes níveis: proporção de resíduo de areia verde de fundição em cinco níveis (0%, 25%, 50%, 75%, 100%) e quantidade de espuma em quatro níveis (5%, 10%, 15%, 20% em relação à massa total). A substituição da areia natural foi feita em relação a massa de material. As influências de cada fator sobre a resistência à compressão, densidade (seca e saturada), índice de vazios e absorção de água foram avaliadas. A partir dos resultados, pode-se observar que todos os fatores tiveram influência significativa sobre as variáveis respostas, isto é, aumentando a quantidade de espuma, a resistência à compressão, a densidade seca e a densidade saturada diminuíram em média 32,9%, 21,0% e 14,5%, respectivamente. Já o índice de vazios e a absorção de água tiveram um aumento, em média, de 44,1% e 76,9%, respectivamente, com o aumento da quantidade de espuma. Também se observou que aumentando o percentual de substituição do resíduo em relação a quantidade de areia natural a densidade seca aumentou, em média 23,7% e a densidade saturada aumentou, em média, 14,1%. A resistência à compressão, o índice de vazios e a absorção de água diminuíram, 29,1%, 31,0% e 43,5%, respectivamente, com o aumento do percentual de substituição. De acordo com os resultados é possível verificar que o resíduo de areia verde de fundição tem potencial para ser utilizado na fabricação de blocos de concreto espumígenos, porém estudos avaliando a durabilidade e os efeitos ambientais devem ser realizados, assim como em estudos anteriores que utilizam esse resíduo em concreto e argamassas convencionais e também em pavimentos.

Palavras-chave: Resíduo da fundição. Concreto não estrutural. Material alternativo. Meio ambiente.

Abstract

The main aim of this work was to evaluate the substitution of the natural sand by the foundry green sand waste in the production of foamed concrete. The experimental design consisted two factors with different levels: proportion of green foundry sand waste at five levels (0%, 25%, 50%, 75%, 100% in relation to total mass) and foam content at four levels (5%, 10%, 15%, 20%). The substitution of natural sand was made in relation to the mass of material. The influences of each factor on compressive strength, density (dry and saturated), air voids and water absorption were evaluated. From the results, it can be seen that all factors had a significant influence on the response variables, i. e., increasing the foam content, the compressive strength, the dry density and the saturated density decreased by an average of 32.9%, 21.0% and 14.5%, respectively. Already the air voids and water absorption increased, on average, by 44.1% and 76.9%, respectively, with the increase in the foam content. It was also observed that increasing the percentage of substitution of the waste in relation to the amount of natural sand, the dry density increased, on average, 23.7% and the saturated density increased, on average, 14.1%. Compressive strength, air void and water absorption decreased, 29.1%, 31.0% and 43.5%, respectively, with the increase in the percentage of substitution. According to the results, it is possible to verify that the foundry green sand waste has the potential to be used in the foamed concrete blocks manufacture, however studies evaluating the durability and environmental effects must be carried out, as well as in previous studies that use this waste, for example, in conventional concrete and mortars and also on pavement.

Keywords: Foundry waste. Non-structural concrete. Alternative material. Environment.

1 Introdução

Visando o cuidado com o meio ambiente e a relevância da sustentabilidade, o ramo industrial vem desenvolvendo pesquisas e revendo formas capazes de reduzir os problemas e os impactos ambientais gerados por resíduos industriais. Assim, a ideia de utilizar o resíduo de areia verde de fundição no desenvolvimento de materiais para construção civil, vem sendo objeto de estudos (CASALI *et al.*, 2018).

A areia verde de fundição, gerada pelas indústrias, tem um enorme potencial para aplicação na construção civil. Sua principal função no ramo de fundição é a confecção de moldes para a produção de peças fundidas (ARMANGE, 2005). Segundo Siddique e Singh (2011), as duas classificações existentes de areia de moldagem no processo de fundição são: as areias a base de bentonita (areia verde) e a base de aglomerantes químicos (areia fenólica). A areia verde é chamada assim, com coloração preta escura, é a mais utilizada para confecção de moldes no ramo de fundição, sendo as características desta, a areia de sílica (80% a 95%), bentonita (5% a 10%) como aglomerante, e pó de carvão (2 a 10 %) como aditivo, este para o aperfeiçoamento de acabamentos de peças do molde, e também água (2 a 5%) para que haja plasticidade facilitando assim a moldagem. Já a areia a base de aglomerantes químicos, tem em sua composição, areia de sílica (93 a 99%) e, geralmente, resinas fenólicas como aglutinante (1 a 3%). Essas areias tem uma característica muito importante que é a capacidade de resistir a altas temperaturas (COUTINHO, 2004; CASALI *et al.*, 2018). Em geral, os resíduos de areia verde de fundição são considerados não perigosos e pertencem à Classe II A - Não inerte, já o resíduo de areia fenólica para a sua classificação depende bastante da concentração de fenol, de acordo com a NBR 10004 (ABNT, 2004; BRONDINO *et al.*, 2015). De acordo com estudos realizados, esses resíduos podem ser usados em argamassas e na confecção de concretos, o que reduz seu volume de depósito em aterros, também devendo-se garantir o encapsulamento correto do resíduo (WANATABE, 2004; ARMANGE, 2005).

Segundo Siddique *et al.* (2009), com o aumento do teor de areia de fundição na substituição do agregado natural (areia de rio) em argamassas, há um aumento de resistência à compressão nas amostras M-2, M-3, M-4, que foi de 4,2%, 5,2% e 9,8%, respectivamente. Os autores concluíram que o aumento da resistência à compressão com a inclusão de areia de fundição provavelmente pode ter sido devido ao fato de o resíduo ser mais fino do que o agregado natural, no que resultou em um concreto mais denso e também podendo ser devido ao conteúdo de sílica presente na areia de fundição.

No trabalho de Pinto (2013) foram realizados estudos da influência do uso do resíduo da areia de fundição em concreto, em experimentos com a fabricação de moldes de corpos de prova com objetivos de substituir a areia natural em diferentes proporções de areia de fundição de 0%, 10% e 20% utilizando cimento CPV. Verificou-se que em seu estado fresco e endurecido, esta substituição como agregado miúdo é tecnicamente viável.

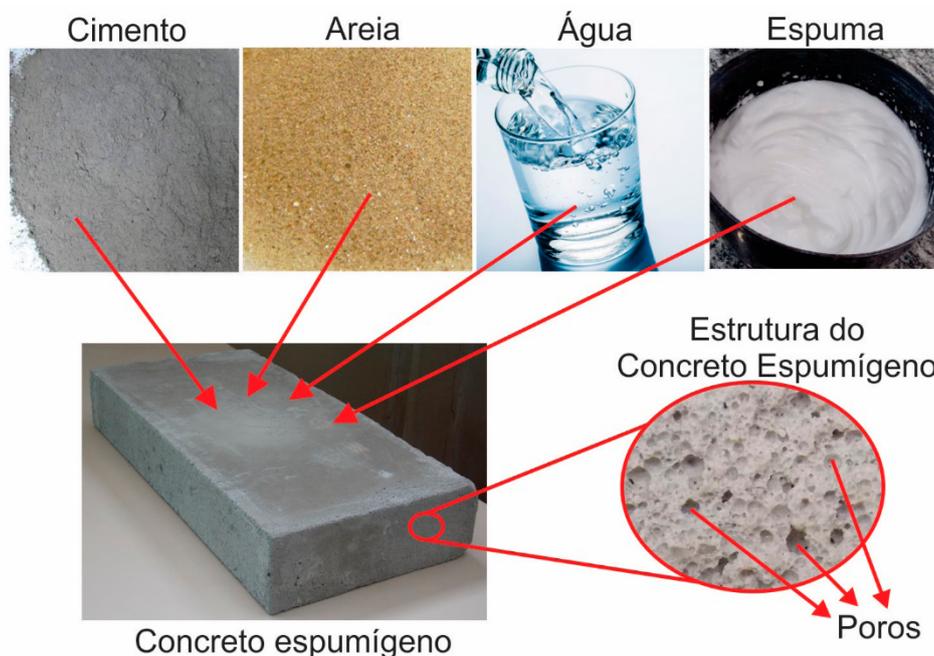
Com o crescimento rápido da infraestrutura, o uso da areia verde de fundição como agregado para o desenvolvimento do concreto tem sido uma alternativa para reduzir impactos ambientais e econômicos através da preservação dos recursos naturais (MANOHARAN *et al.*, 2018).

A utilização de concretos espumígenos é conhecida como uma alternativa viável e eficiente podendo para serem utilizados em fins não estruturais como por exemplo em situações de isolamentos acústicos e térmicos, pois neste tipo de concreto a resistência à compressão é muito baixa. Os mesmos podem ser gerados a partir do uso de introdução de bolhas de ar distribuídas na argamassa: através da adição de espuma pré-formada ou aditivos químicos (RAMAMURTHY *et al.*, 2009).

O primeiro a patentear o concreto espumígeno foi o Sueco E.Chr. Bayer em 1925, usando os seguintes agentes espumígenos: cola vegetal, gelatina e sabão de resina. Nos anos 70, foram descobertos produtos químicos orgânicos, que melhoraram o índice de expansão volumétrica e também de estabilidade da espuma. A partir daí foram testados vários processos de fabricação do concreto espumígeno (FERREIRA E TEZUKA, 1987).

De acordo com Amran *et al.* (2015), o concreto espumígeno é um tipo de argamassa produzido a partir da mistura de cimento, areia e água e espuma (Figura 1), no qual as bolhas de ar formadas pela espuma adequada formam uma rede de poros na matriz cimentícia. O concreto espumígeno também pode ser classificado como concreto celular, no qual a densidade pode variar de 300 kg/m³ a 1800 kg/m³.

Figura 1 – Materiais para confecção do concreto espumígeno



A NBR 12646 (ABNT, 1992) determina que o agente espumígeno é o produto de uma composição química que pode produzir bolhas de ar estáveis dentro de pastas

de cimento ou argamassas. Essas bolhas devem permanecer intactas durante todo o processo de produção. Segundo Chica *et al.* (2019), essa inserção do agente espumígeno determina algumas características do material, como baixo peso, baixa condutividade térmica, alta resistência ao fogo, baixa resistência à compressão.

Raj *et al.* (2019), recentemente, apresentaram uma revisão sobre as características dos concretos espumígenos, na qual constaram que a estabilidade da espuma é um aspecto significativo que afeta amplamente a resistência mecânica do concreto espumígeno. Também, para a produção de concretos espumígenos de qualidade, muitos fatores devem ser considerados, tais como: método de preparação de espuma, tipo de agente espumígeno, precisão da mistura, tipo de surfactantes e aditivos utilizados, relação água/cimento, etc. Os autores também concluíram que durabilidade do concreto espumígeno depende da conectividade entre os poros, ou seja, quanto maior for a conexão entre os poros maior será a entrada de impurezas e conseqüentemente, menor a durabilidade. Ao final da revisão, Raj *et al.* (2019) propuseram alguns estudos futuros sobre concreto celular espumígeno: estudar os fatores que afetam a estabilidade da espuma; estudar as propriedades física e mecânicas de concretos espumígenos com adição de fibras; desenvolver concreto espumígeno de baixa densidade e alta resistência mecânica, a fim de usar como material altamente eficiente em termos energéticos e estruturais; e estudar o efeito da adição de outros componentes (agregados, aditivos, resíduos, etc.) no desenvolvimento de concreto espumígeno.

Em estudos realizados com aproveitamento de resíduos, Favaretto *et al.* (2017) realizaram pesquisas com a reutilização do RCD, e definiram que este pode ser usado em concretos celulares espumígenos com aspectos positivos, como a resistência à compressão superior a exigida pela NBR 12646 (ABNT,1992), mas em virtude da variação de granulometrias deve ser realizado a caracterização dos RCD's. Em relação aos estudos de utilização do resíduo de areia verde de fundição no desenvolvimento de concretos espumígenos, não foi encontrado nenhum tipo de pesquisa relacionado a esta aplicação desse resíduo.

O objetivo principal deste trabalho foi substituir a areia natural por areia verde de fundição no concreto espumígeno, possibilitando determinar a influência da areia verde de fundição e a quantidade de espuma sobre propriedades de concreto espumígeno.

2 Material e Métodos

2.1 Materiais

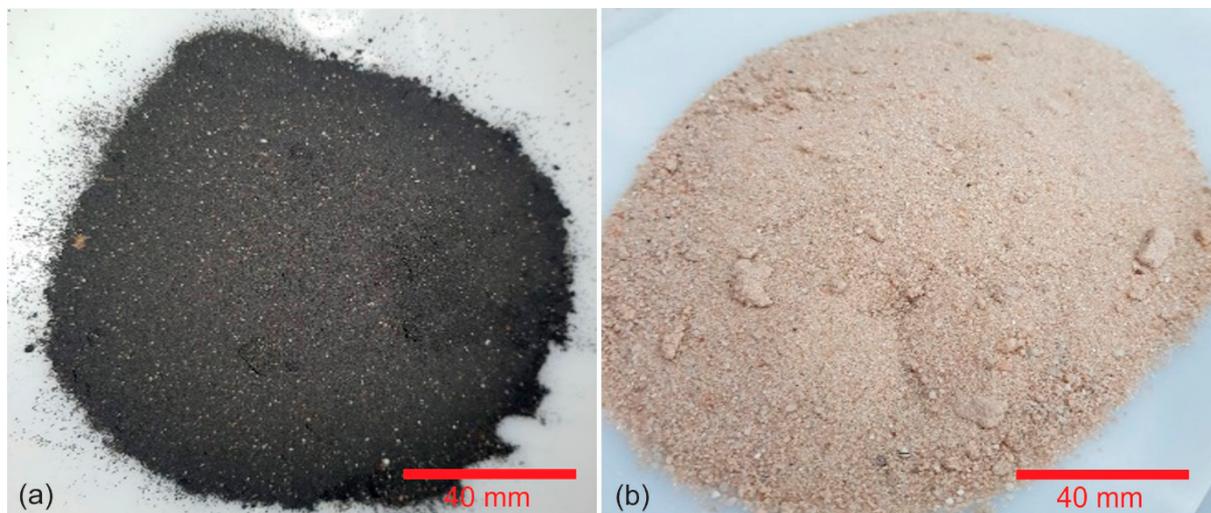
2.1.1 Cimento

O cimento utilizado foi o Cimento Portland de alta resistência à compressão inicial (CP V-ARI), com as seguintes propriedades: finura de 410 m²/kg, resistência à compressão em 28 dias de 50 MPa; e a massa específica de 3120 kg/m³ (CIMENTOS ITAMBÉ, 2017). Esse cimento foi escolhido por fornecer o endurecimento no menor tempo de cura, possibilitando os desmolde em 24 horas.

2.1.2 Agregados Miúdos

O resíduo de areia verde de fundição (RAVF) utilizado nos experimentos foi obtido após a utilização em várias confecções de moldes para peças fundidas, de uma empresa de fundição localizada na região de Passo Fundo, RS. Na Figura 2(a) pode-se observar esse resíduo, que tem como principal característica ser um agregado fino, com granulometria que varia de 0,002 mm a 1,2 mm em seu diâmetro. Também, na Figura 2(b) é possível visualizar a areia natural utilizada para este experimento.

Figura 2 – Agregados. (a) RAVF, (b) areia natural

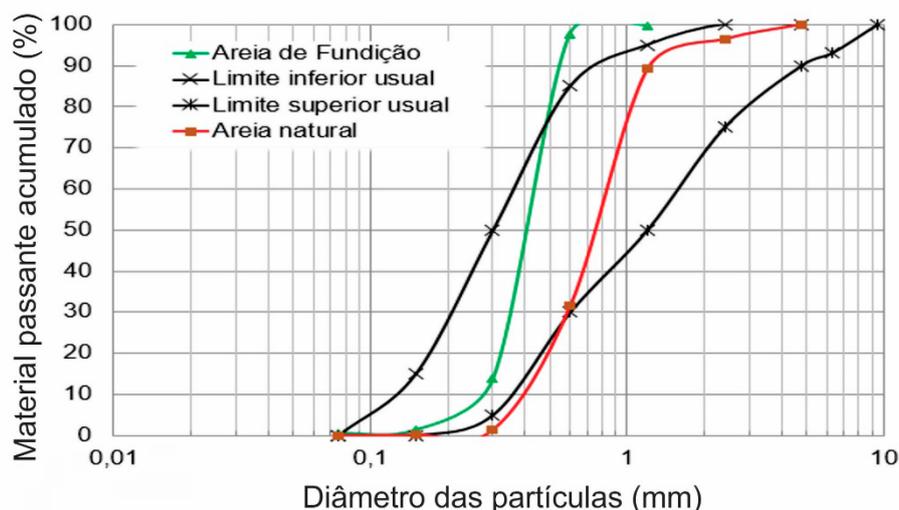


Para que fosse determinada a caracterização da RAVF e da areia natural, ensaios de massa específica aparente foram realizados conforme a norma NBR NM 52 (ABNT,2009), e ensaios para a caracterização da curva granulométrica seguidos conforme a norma NBR NM 248 (ABNT,2003), sendo assim o resultado da massa específica para RAVF foi de 1950 kg/m³ e para areia natural foi de 2160 kg/m³.

No gráfico da Figura 3, pode-se observar a curva granulométrica das duas areias. É possível identificar que no agregado RAVF cerca de 85% dos grãos possuem

diâmetros de agregados entre 0,3 mm e 0,6 mm, e outros 15% estão entre 0,15 mm e 0,075 mm. Já a areia natural tem, aproximadamente, 68% dos grãos com diâmetros entre 2,4 mm e 0,6 mm e 32% entre 0,3 mm e 0,075 mm. O módulo de finura para o RAVF e a areia natural foi de 2,87 e 3,81, respectivamente. A dimensão máxima característica (DMC) foi de 0,6 mm para a RAVF e 2,4 mm para a areia natural. Os valores de módulo de finura obtidos estão de acordo com os limites de zona ótima estabelecidos pela norma brasileira NBR 7211 (ABNT, 2009).

Figura 3 – Curvas granulométrica das areias



2.1.3 Agente Espumígeno

A espuma utilizada na produção dos corpos de prova foi produzida em um misturador mecânico com água e agente espumígeno amida 90 na proporção de 1:10 sendo 1g de amida 90 e 90g de água. A amida 90, conhecida como dietanolamina de óleo de coco condensado, é uma mistura das dietanolamina dos ácidos graxos que constituem o óleo de coco, esta proporção foi estabelecida em estudos anteriores (FAVARETTO *et al.*, 2017). Um agitador mecânico foi usado para produzir a espuma com uma densidade aparente de 100 kg/m³.

2.2 Caracterização e confecção dos corpos de provas cilíndricos

Para a confecção dos corpos de prova, foram seguidos os passos e as exigências conforme a NBR 5738 (ANBT, 2016) que trata de moldagem e cura de corpos de prova cilíndricos ou prismáticos de concreto. Para a produção dos corpos de prova, primeiramente foi misturado em um recipiente o cimento, o RAVF conforme sua proporção indicada pelo traço, a água, até atingirem plena uniformidade.

Para a produção da espuma, a água e o agente espumígeno foram adicionados em um misturador por 8 minutos, em velocidade constante, após esse tempo foi

determinada a densidade da espuma, a qual foi, em média, 100 kg/m^3 . Sequencialmente, a espuma foi adicionada junto a mistura homogênea e misturada por, aproximadamente, 10 minutos com velocidade constante até a argamassa ficar totalmente homogêneo. A mistura foi imediatamente adicionada em moldes cilíndricos com dimensões de $100 \times 50 \text{ mm}$ e adensada por vibração mecânica (mesa vibratória) por 1 minuto.

Após as 24 horas os corpos de prova foram desmoldados e envoltos por plástico filme até os 28 dias de cura. Os corpos de prova foram curados ao ar em temperatura ambiente. Após o tempo de cura dos corpos de prova de concreto celular espumígeno foram realizados os ensaios para avaliação das suas características obtendo-se os valores resultantes, os quais foram analisados estatisticamente.

Os ensaios de resistência à compressão foram realizados utilizando uma prensa hidráulica marca EMIC modelo PC 100 C (EMIC-PC100C, Instron, Norwood, MA, EUA) seguindo a norma brasileira NBR 5739 (ABNT, 2018).

Os valores de absorção de água por imersão, densidade úmida, densidade seca e índices de vazios foram obtidos após testes, conforme descrito pelos padrões ASTM C948-81 (ASMT, 2009) e NBR 9778 (ABNT, 2009).

2.3 Projeto experimental

Neste estudo, foram utilizados dois parâmetros como fatores de controle: quantidade de espuma (quatro níveis) e o percentual de substituição de areia verde de fundição em massa (cinco níveis, sendo eles de 0%, 25%, 50%, 75% e 100%) para a produção da argamassa. Outros parâmetros foram mantidos constantes, tais como: relação água/cimento, apenas modificando quantidade de água, para assim ser modificado a quantidade de espuma nos quatro níveis, sendo ela considerada 98% água, a quantidade e tipo de cimento.

As seguintes variáveis respostas foram analisadas: resistência à compressão, densidades secas e saturadas, índices de vazios (porosidade) e absorção de água.

Uma matriz experimental com 20 diferentes tipos de traço foi implementada, sendo seis corpos de prova de cada traço foram preparados: três deles foram utilizados para ensaios de resistência à compressão, e os três restantes foram utilizados nos outros ensaios. Um total de 120 corpos de prova foram produzidos. O delineamento experimental foi baseado no método estatístico fatorial completo, com os respectivos valores mostrados na Tabela 1.

Os traços foram escolhidos por meio de testes preliminares buscando a menor relação água/cimento, isto é, foram realizados experimentos prévios variando a quantidade de água e espuma para que a massa cimentícia atingisse uma consistência entre 220 e 280 mm para as diferentes proporções de RAVF em substituição a areia natural. A escolha dos percentuais de substituição foi de acordo com a maior variabilidade possível, isto é, sem substituição (0% - referência) e 100% de substituição.

Tabela 1 – Matriz experimental com todas as misturadas utilizadas.

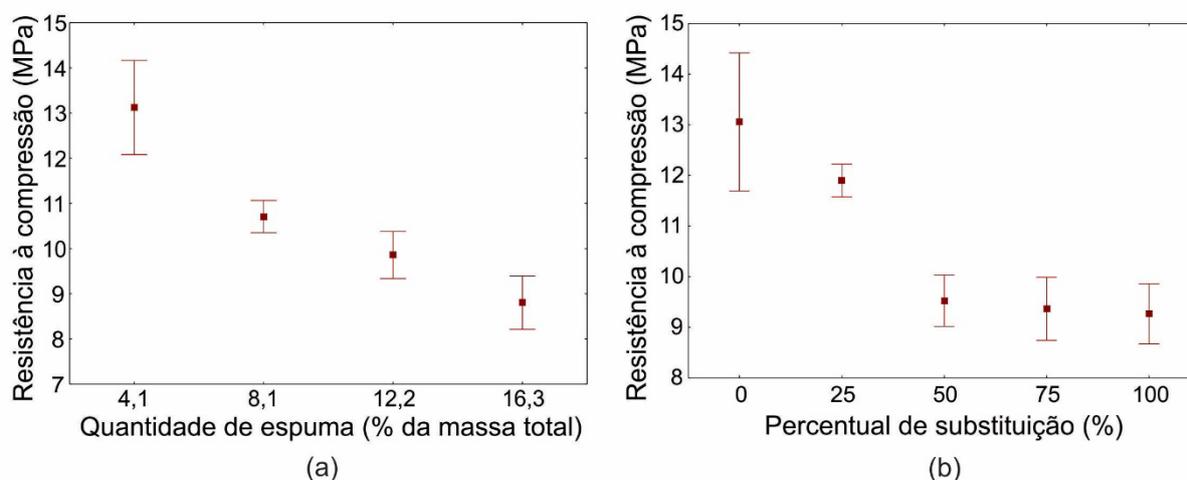
Ordem	RAVF	Quant. de espuma	Razão A/C	Tipo de cimento	Quant. de cimento (g)	Areia Natural (g)	RAVF (g)	Espuma (g)	Água (g)
1	0%	0,05	0,45	CP V - ARI	1000	1000	0	100	352
2	0%	0,1	0,45	CP V - ARI	1000	1000	0	200	254
3	0%	0,15	0,45	CP V - ARI	1000	1000	0	300	156
4	0%	0,2	0,45	CP V - ARI	1000	1000	0	400	58
5	25%	0,05	0,45	CP V - ARI	1000	750	250	100	352
6	25%	0,1	0,45	CP V - ARI	1000	750	250	200	254
7	25%	0,15	0,45	CP V - ARI	1000	750	250	300	156
8	25%	0,2	0,45	CP V - ARI	1000	750	250	400	58
9	50%	0,05	0,45	CP V - ARI	1000	500	500	100	352
10	50%	0,1	0,45	CP V - ARI	1000	500	500	200	254
11	50%	0,15	0,45	CP V - ARI	1000	500	500	300	156
12	50%	0,2	0,45	CP V - ARI	1000	500	500	400	58
13	75%	0,05	0,45	CP V - ARI	1000	250	750	100	352
14	75%	0,1	0,45	CP V - ARI	1000	250	750	200	254
15	75%	0,15	0,45	CP V - ARI	1000	250	750	300	156
16	75%	0,2	0,45	CP V - ARI	1000	250	750	400	58
17	100%	0,05	0,45	CP V - ARI	1000	0	1000	100	352
18	100%	0,1	0,45	CP V - ARI	1000	0	1000	200	254
19	100%	0,15	0,45	CP V - ARI	1000	0	1000	300	156
20	100%	0,2	0,45	CP V - ARI	1000	0	1000	400	58

3 Resultados e discussões

3.1 Resistência à compressão

Na Figura 4(a) tem-se o gráfico de resistência à compressão em função da quantidade de espuma na qual é o percentual da massa total de sólidos. Como o esperado, observa-se que aumentando a quantidade de espuma, a resistência à compressão diminui, isso ocorre devido à incorporação de ar no interior, ocasionando poros na estrutura, diminuindo assim a densidade e, conseqüentemente, a resistência à compressão. Na Figura 4(b) mostra o gráfico de resistência à compressão em relação a percentual de substituição de areia verde de fundição. Pode-se observar que aumentando a proporção de RAVF, a resistência à compressão tende a diminuir significativamente até uma proporção de 50%, após a substituição com maior percentual pode-se notar que o resíduo manteve, praticamente, a mesma resistência à compressão. Os resultados encontrados para o percentual substituição de areia verde de fundição estão de acordo com estudos realizados por de Matos, *et al.* (2019) e Makul e Sua-Iam (2018).

Figura 4 – (a) Resistência à compressão em função quantidade de espuma e (b) percentual de substituição



Os valores obtidos no gráfico da resistência à compressão são todos após os 28 dias de cura, sendo que todos os corpos de prova foram maiores que o valor mínimo exigido que é de 2,5 MPa pela NBR 12646 (ABNT, 1992), a qual determina a resistência para paredes de concreto celular espumígeno. No entanto é importante enfatizar que não existe norma brasileira para blocos de concreto celular espumígeno.

Por meio da Tabela 2, pode ser observada a análise de variância para a resistência à compressão. Por meio do P-valor, menor que 0,05, pode-se observar que a quantidade de espuma e a proporção de areia verde de fundição tiveram influência significativa sobre a resistência à compressão, com uma confiabilidade de 95%. Também pode-se observar que há uma interação entre os fatores, isto é, existe uma diferença de comportamento do

percentual de substituição nos diferentes níveis da quantidade espuma com respeito a resistência à compressão (há evidências que os fatores não são independentes).

Tabela 2 – Análise de variância para a resistência a compressão

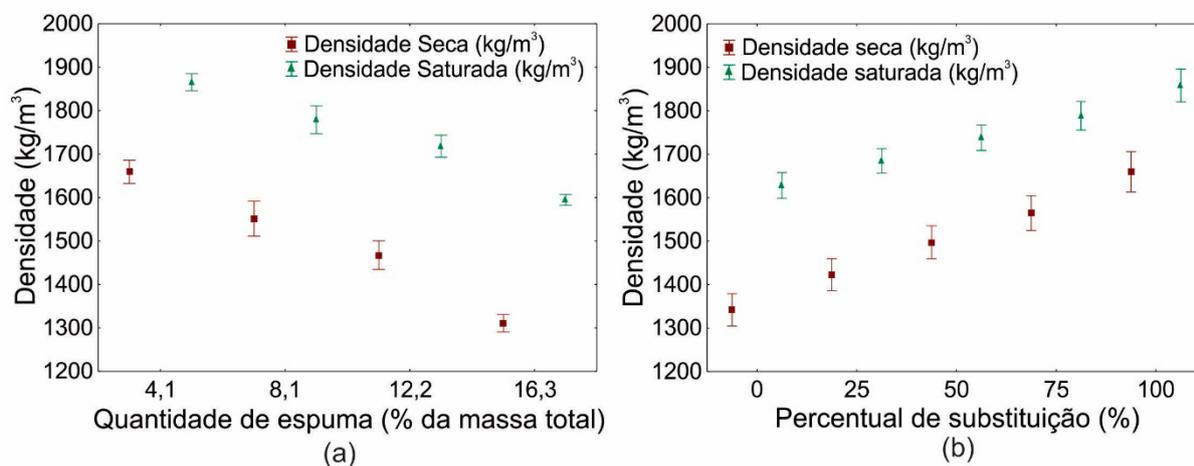
Fator	Grau de liberdade	Soma dos quadrados	Média dos quadrados	F-valor	P-valor
Percentual de substituição (PS)	4	146,303	36,576	11,788	0,0000
Quantidade de Espuma (QE)	3	152,314	50,771	16,363	0,0000
PS*QE	12	114,861	9,572	3,085	0,0034
Erro	40	124,114	3,103		

Nota: “*” significa a interação entre os fatores.

3.2 Densidades seca e saturada

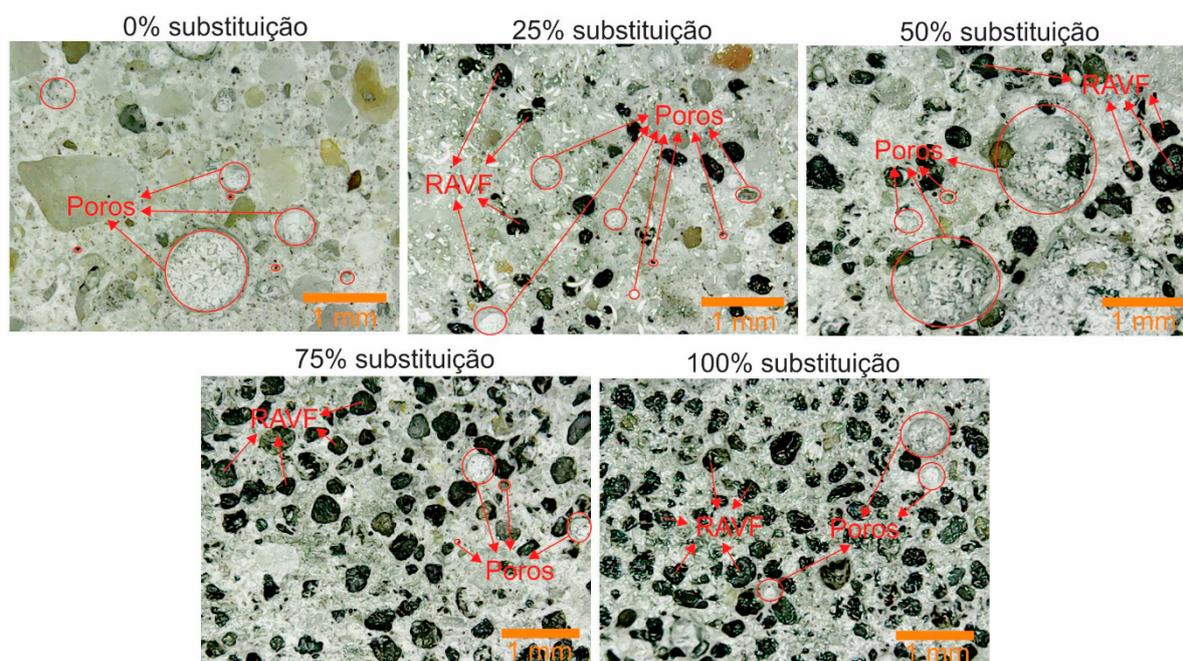
Na Figura 5 podem ser observados os gráficos das densidades seca e saturada em relação a quantidade de espuma (Figura 5(a)) e o percentual de substituição (Figura 5(b)). Como se esperava, as densidades diminuíram com o aumento da quantidade de espuma, pois aumentando a quantidade de espuma, aumenta a inserção de bolhas de ar no interior do concreto e conseqüentemente aumenta a quantidade de poros. Isso está de acordo com os estudos de Favaretto, *et al.* (2017) e Lermen, *et al.* (2019).

Figura 5 – Densidades (seca e saturada) em função da (a) quantidade de espuma e do (b) percentual substituição



Em relação ao percentual de substituição, pode ser visto que aumentando a substituição da areia natural pelo RAVF as densidades (seca e saturada) aumentam. Esse comportamento pode ser devido ao RAVF ter uma grande quantidade de finos e assim preenchendo uma quantidade maior dos vazios da matriz cimentícia. Isso pode ser visualizado através da Figura 6, na qual é possível visualizar as macrografias dos corpos de prova para os diferentes percentuais de substituição e como adição de 8,1% de espuma em relação à massa total. Também é possível observar uma distribuição homogênea do RAVF na matriz cimentícia.

Figura 6 – Macrografias dos corpos de prova confeccionados com diferentes proporções de substituição de areia natural por RAVF



Outro fato que pode ser abordado são os elevados valores de densidade (acima de 1300 kg/m^3) encontrados para os concretos espumígenos desenvolvidos. Isso pode ser explicado avaliando o processo de fabricação dos corpos de prova, isto é, foram utilizados 10 minutos de agitação da argamassa e isso, possivelmente, contribuiu para a destruição das bolhas. Também, a vibração mecânica utilizada no adensamento pode ser influenciado na aniquilação das bolhas.

Nas Tabelas 3 e 4, pode ser observada a análise de variâncias para a densidade seca e saturada, respectivamente. Pode-se observar que a quantidade de espuma, a proporção de RAVF e a interação entre esses fatores têm influência significativa sobre as densidades (seca e saturada), com uma confiabilidade de 95%.

Tabela 3 – Análise de variância para a densidade seca

Fator	Grau de liberdade	Soma dos quadrados	Média dos quadrados	F-valor	P-valor
Percentual de substituição (PS)	4	727839	181960	418,7	0,000000
Quantidade de Espuma (QE)	3	972715	324238	746,2	0,000000
PS*QE	12	61179	5098	11,7	0,000002
Erro	40	17382	435		

Nota: “*” significa a interação entre os fatores.

Tabela 4 – Análise de variância para a densidade saturada

Fator	Grau de liberdade	Soma dos quadrados	Média dos quadrados	F-valor	P-valor
Percentual de substituição (PS)	4	382889	95722	224,6	0,000000
Quantidade de Espuma (QE)	3	583499	194500	456,3	0,000000
PS*QE	12	65725	5477	12,9	0,000000
Erro	40	17048	426		

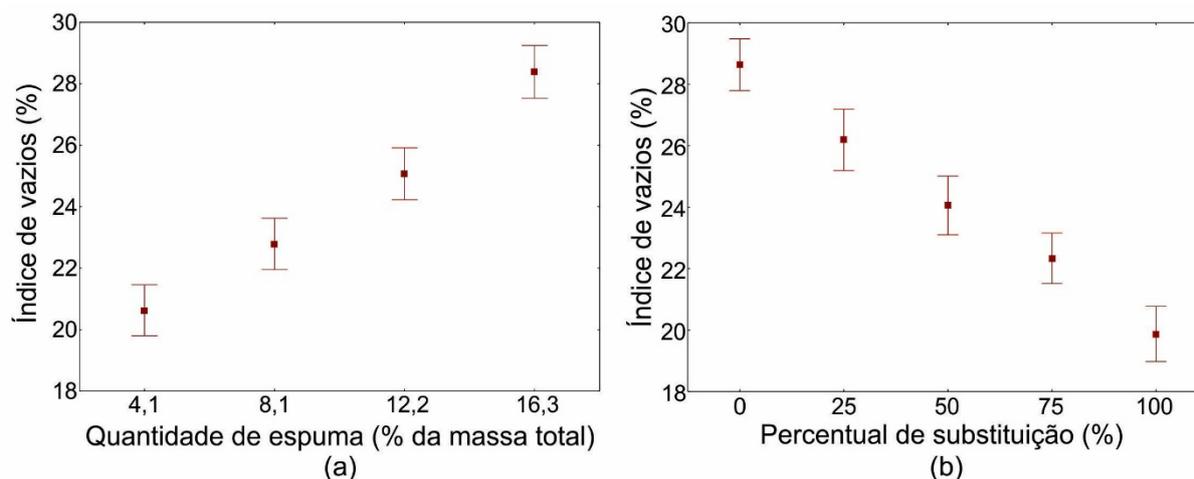
Nota: “*” significa a interação entre os fatores.

3.3 Índices de vazios

O gráfico de índices de vazios em relação a quantidade de espuma (% da massa total dos sólidos) poder ser avaliado na Figura 7(a). Observa-se que os corpos de prova que tiveram adição de 4,1%; 8,1%; 12,2% e 16,3% apresentaram, em média, índice de vazios de 20,6%; 22,8%; 25% e 28,40% respectivamente.

Segundo estudos realizados por Siddique et al. (2011), a substituição de areia natural por resíduo de areia verde de fundição em materiais cimentícios reduz a porosidade desses materiais, isto é, esse tipo de resíduo possui uma grande quantidade de finos em sua composição que ocupam a maior quantidade de espaços vazios na matriz cimentícia reduzindo a quantidade de poros (índice de vazios). Esses resultados estão de acordo com os resultados encontrado no presente trabalho, onde o índice de vazios diminui com o aumento do percentual de substituição da areia natural por resíduo de areia verde de fundição, conforme pode ser verificado na Figura 7(b).

Figura 7 – Índices de vazios em relação (a) a quantidade de espuma e (b) percentual de substituição



Na Tabela 5 tem-se a análise de variância para índices de vazios, na qual pode-se observar que, com 95% de confiabilidade, a quantidade de espuma e a proporção de areia verde de fundição apresentam influência significativa nos corpos de prova

de concreto celular espumígeno. Também, pode-se verificar que não há evidências da interação entre os fatores. A quantidade de espuma é o fator que tem maior influência sobre o índice de vazios, pois apresenta um maior valor de F comparado com a proporção de RAVF.

Tabela 5 – Análise de variância para Índices de vazios

Fator	Grau de liberdade	Soma dos quadrados	Média dos quadrados	F-valor	P-valor
Percentual de substituição (PS)	4	550,30	137,57	191,26	0,000000
Quantidade de Espuma (QE)	3	496,17	165,39	229,93	0,000000
PS*QE	12	17,07	1,42	1,98	0,053228
Erro	40	28,77	0,72		

Nota: “*” significa a interação entre os fatores.

3.4 Absorção de água

A Figura 8(a) mostra o gráfico de absorção de água em relação a quantidade de espuma visualizado, onde é possível visualizar que o aumento da quantidade de espuma adicionada aumenta a absorção de água. Segundo Gomes et al. (2015) e Lermen *et al.* (2019), esse fenômeno ocorre devido ao aumento da quantidade de vazios total e do aumento da conectividade entre os poros.

Na Figura 8(b), pode-se observar o percentual de absorção de água em relação a proporção de RAVF. Foi observado que aumentando a proporção de substituição, a absorção de água diminui. Em estudos anteriores, Siddique et al. (2011) também concluíram que acima de 5% de substituição da areia natural por resíduo de areia verde de fundição, a absorção de água é reduzida. Isso pode ser explicado porque esse tipo de resíduo diminui a quantidade de vazios no concreto e, conseqüentemente, reduz a absorção de água.

Na Tabela 6 tem-se a análise de variância para absorção de água, com a qual pode-se afirmar com 95% de confiabilidade que quantidade de espuma, proporção de areia verde de fundição e interação entre esses fatores influenciam significativamente na absorção de água.

Figura 8 – Gráfico de absorção de água em relação (a) a quantidade de espuma e (b) percentual de substituição

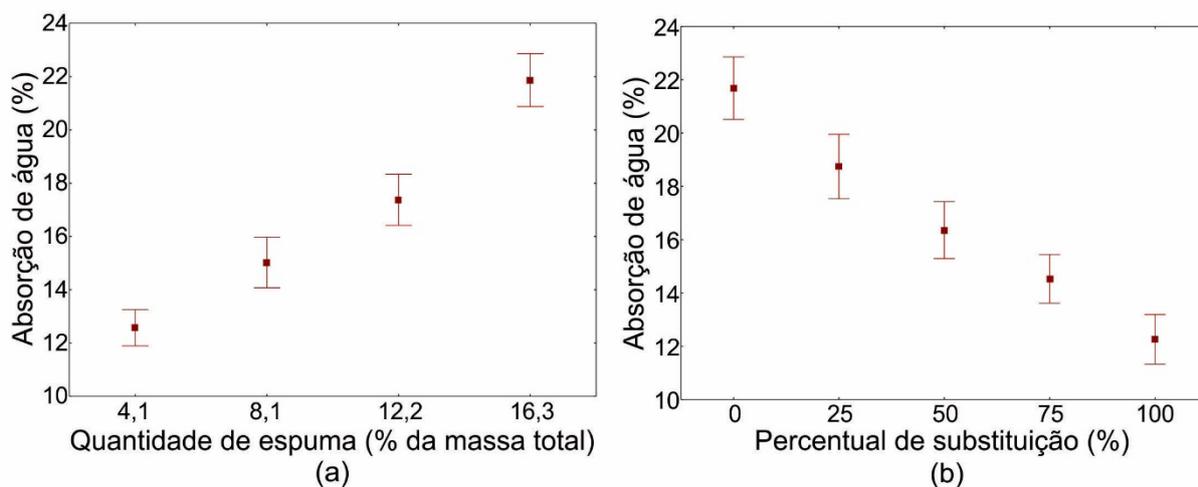


Tabela 6 – Análise de variância para Absorção de água

Fator	Grau de liberdade	Soma dos quadrados	Média dos quadrados	F-valor	P-valor
Percentual de substituição (PS)	4	642,92	160,73	254,70	0,000000
Quantidade de Espuma (QE)	3	705,00	235,00	372,39	0,000000
PS*QE	12	20,14	1,68	2,66	0,010114
Erro	40	25,24	0,63		

Nota: “*” significa a interação entre os fatores.

4 Conclusões

Após as análises dos resultados podem ser feitas as seguintes conclusões:

- ♦ O RAVF pode ser utilizado na confecção de concreto espumígeno, podendo ser uma alternativa de redução dos impactos ambientais negativos causados pelo descarte do RAVF. Além disso, o uso desse resíduo como agregado pode contribuir na redução da extração de areia natural prevenindo os danos ambientais provocado pela extração desse mineral nos leitos dos rios. Porém estudos referentes a lixiviação e solubilização dos concretos espumígenos desenvolvidos com RAVF devem ser realizados.
- ♦ Os valores encontrados para a resistência à compressão dos corpos de prova estão acima do valor mínimo exigido pela NBR 12646 (ABNT, 1992), sendo de no mínimo 2,5 MPa para paredes de concreto espumígeno.
- ♦ A densidade seca e a densidade saturada diminuíram 21,0% e 14,5%, respectivamente, com o aumento de espuma na estrutura dos concretos produzidos.

- ♦ A quantidade de espuma e o percentual de substituição de RAVF influenciaram significativamente as propriedades de índice de vazios e absorção de água na estrutura dos concretos espumígenos desenvolvidos, isto é, como esperado, aumentando a quantidade de espuma, o índice de vazios e a absorção de água aumentaram e aumentando o percentual de substituição de RAVF, o índice de vazios e absorção de água diminuíram. Para um concreto espumígeno, baixos valores de porosidade (índice de vazios menor que 30%) foram encontrados, sendo necessário estudos aumentando a quantidade de espuma adicionada à massa cimentícia.

Por fim, o estudo preliminar do uso de resíduo de areia verde de fundição para confecção de concreto celular espumígeno mostrou-se promissor para o desenvolvimento de blocos de concreto celular espumígeno, porém estudos avaliando a condutividade térmica, a solubilização, a lixiviação, a durabilidade e as questões econômicas devem ser realizadas.

Referências

- AMRAN, Y. H. M.; FARZADNIA, N.; ALI, A. A. A. Properties and applications of foamed concrete: a review. *Construction and Building Materials*, v. 101, p. 990-1005, 2015.
- ARMANGE, L. C. *Utilização de areia de fundição residual para uso em argamassa*. 2005. Dissertação de mestrado, Programa de Pós-Graduação em Ciência e Engenharia de Materiais, Universidade do Estado de Santa Catarina - UDESC.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). *NBR 10004 - Resíduos sólidos*. Rio de Janeiro: ABNT, 2004.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). *NBR 12646 - Execução de paredes de concreto celular espumoso moldadas no local*. Rio de Janeiro, Brasil, 1992.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). *NBR 5738 — Concreto - Procedimento para moldagem e cura de corpos de prova*. Associação Brasileira de Normas Técnicas: Rio de Janeiro, 2016.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). *NBR 5739 Concreto — Ensaio de Compressão de Corpos-de-Prova Cilíndricos*; Associação Brasileira de Normas Técnicas: São Paulo, 2007.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). *NBR 7211: Agregados para concreto-Especificação*. Rio de Janeiro, 2009.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). *NBR 9778 - Argamassa e concreto endurecidos-Determinação da absorção de água, índice de vazios e massa específica*, 2009.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). *NBR NM 248—Agregados—Determinação da Composição Granulométrica*. São Paulo, Brasil, 2003.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). *NBR, NM 52 Agregado miúdo-Determinação da massa específica e massa específica aparente*, 2009.
- ASTM - AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS, *C 948-81*. Standard—Dry And Wet Bulk Density, Water Absorption and Apparent Porosity of Thin Sections of Glass-Fiber Reinforced Concrete. West Conshohocken, PA, USA, 2009.
- CASALI, J. M.; MIGUEL, T. F.; FELIZARDO, C. C.; MEIRA, N. dos S.; DOMINGUINI, L.; BETIOLI, A. M. Caracterização e influência do teor do resíduo de areia de fundição fenólica em argamassas de revestimento. *Ambiente Construído*, v. 18, n. 1, p. 261-279, 2018. ISSN 1678-8621.
- CHICA, L.; ALZATE, A. Cellular concrete review: New trends for application in construction. *Construction and Building Materials*, v. 200, p. 637-647, 2019. ISSN 0950-0618.
- DE MATOS, P. R.; MARCON, M. F.; SCHANKOSKI, R. A.; PRUDÊNCIO, L. R. Jr. Novel applications of waste foundry sand in conventional and dry-mix concretes. *Journal of environmental management*, v. 244, p. 294-303, 2019.
- FAVARETTO, P.; HIDALGO, G. E. N.; SAMPAIO, C. H.; SILVA, R. de A.; LERMEN, R. T. Characterization and use of construction and demolition waste from south of Brazil in the production of foamed concrete blocks. *Applied Sciences*, v. 7, n. 10, p. 1090, 2017.

FERREIRA, O. A. R.; TEZUKA, Y. *Concretos leves: O concreto celular espumoso*. 1987. Boletim Técnico do Departamento de Engenharia de Construção Civil, USP.

GOMES, P. C. C.; ALENCAR, T. F. F. de; SILVA, N. V. da; MORAES, K. A. de; ÂNGULO, S. C. Obtenção de concreto leve utilizando agregados reciclados. *Ambiente Construído*, 15, 31-46. 2015.

ITAMBÉ, CIMENTO. Relatório de ensaio. *Cimento Itambé*, 2017.

LERMEN, R. T.; FAVARETTO, P.; SILVA, R. de A.; HIDALGO, G. E. N.; TUBINO, R. M. C.; TIECHER, F. Effect of Additives, Cement Type, and Foam Amount on the Properties of Foamed Concrete Developed with Civil Construction Waste. *Applied Sciences*, v. 9, n. 15, p. 2998, 2019.

MAKUL, N.; SUA-IAM, G. Innovative utilization of foundry sand waste obtained from the manufacture of automobile engine parts as a cement replacement material in concrete production. *Journal of cleaner production*, v. 199, p. 305-320, 2018.

MANOHARAN, T.; LAKSMANAN, D.; MYLSAMY, K.; SIVAKUMAR, P.; SIRCAR, A. Engineering properties of concrete with partial utilization of used foundry sand. *Waste management*, v. 71, p. 454-460, 2018. ISSN 0956-053X.

PINTO, F. B. *O uso de areia descartada de fundição (ADF) na produção de concreto*. 2013. Dissertação de Mestrado, Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Materiais, Universidade Federal de Itajubá – UNIFEI.

RAJ, A.; SATHYAN, D.; MINI, K. M. Physical and functional characteristics of foam concrete: A review. *Construction and Building Materials*, v. 221, p. 787-799, 2019.

RAMAMURTHY, K.; NAMBIAR, E. K.; RANJANI, G. I. S. A classification of studies on properties of foam concrete. *Cement and concrete composites*, v. 31, n. 6, p. 388-396, 2009. ISSN 0958-9465.

SIDDIQUE, R.; DE SCHUTTER, G.; NOUMOWE, A. Effect of used-foundry sand on the mechanical properties of concrete. *Construction and Building Materials*, v. 23, n. 2, p. 976-980, 2009. ISSN 0950-0618.

SIDDIQUE, R.; SINGH, G. Utilization of waste foundry sand (WFS) in concrete manufacturing. *Resources, Conservation and Recycling*, v. 55, n. 11, p. 885-892, 2011. ISSN 0921-3449.

WANATABE, F. A. *Estudo sobre a utilização de areia de fundição residual como agregado na confecção de pavimentos de concreto*. 2004. Dissertação de Mestrado, Programa de Pós-Graduação em Ciência e Engenharia de Materiais, Universidade do Estado de Santa Catarina - UDESC.

ZORDAN, S. E. *A utilização do entulho como agregado, na confecção do concreto*. 1997. Dissertação de Mestrado, Faculdade de Engenharia Civil, Departamento de Hidráulica e Saneamento, Universidade Estadual de Campinas – UNICAMP.