



ISSN: 2230-9926

Available online at <http://www.journalijdr.com>

IJDR

International Journal of Development Research

Vol. 11, Issue, 09, pp. 50006-50012, September, 2021

<https://doi.org/10.37118/ijdr.22737.09.2021>



RESEARCH ARTICLE

OPEN ACCESS

AGENTES INCORPORADORES DE AR E AGREGADOS SUBSTITUINTES EM CONCRETO CELULAR – UMA REVISÃO

Aline Alves Milhomem da Silva*¹, Rodrigo da Silva Magalhães², Gizele Saraiva de Sousa³, Tarcísio Felipe Vieira de Sousa⁴, Érico Rodrigues Gomes⁵ and Gilvan Moreira da Paz⁶

^{1,2,5,6}Programa de Pós - Graduação em Engenharia de Materiais – PPGEM/IFPI, Teresina, Piauí, Brasil.

^{3,4}Grupo Kalfix - Indústria, Comércio e Engenharia Ltda, Teresina, Piauí, Brasil

ARTICLE INFO

Article History:

Received 28th June, 2021

Received in revised form

06th July, 2021

Accepted 20th August, 2021

Published online 27th September, 2021

Key Words:

Concreto celular, Concreto espumoso, Concreto leve, Agentes incorporadores, Agregados substituintes.

*Corresponding author:

Aline Alves Milhomem da Silva,

ABSTRACT

O concreto celular (ou concreto espumoso) é um tipo de concreto leve que utiliza a incorporação de bolhas em sua massa cimentícia para diminuir sua massa específica mantendo seu volume. Essas bolhas são adicionadas através de aditivos incorporadores de ar que possuem a função de formar bolhas estáveis, homogêneas e de tamanho apropriado para este tipo de concreto. Alinhado ao aditivo, também se faz uso em concreto celular da substituição parcial ou total de agregados, com o objetivo de aumentar a força de resistência. Esses agregados podem ser de origem natural ou artificial, sendo que muitos trabalhos abordam a temática ambiental e utilizam resíduos em sua composição. Essa revisão bibliográfica tem por objetivo quantificar os trabalhos sobre concreto celular, dando enfoque nos agentes incorporadores de ar e nos diferentes tipos de agregados substituintes utilizados nos estudos presentes na literatura dos últimos cinco anos. Na busca inicial foram encontrados 1.828 trabalhos, onde deste total utilizando os critérios de inclusão e exclusão foram selecionados 174 estudos para esta revisão. Foram observados os aspectos atuais acerca do concreto celular, as tendências de agregados, e adições à massa cimentícia. As incorporações de distintos materiais com o objetivo de obter um melhor desempenho mecânico, economia ambiental, e utilização do concreto celular na indústria cimentícia, apresentaram resultados promissores.

Copyright © 2021, Aline Alves Milhomem da Silva et al., This is an open access article distributed under the Creative Commons Attribution License, which permits unrestricted use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

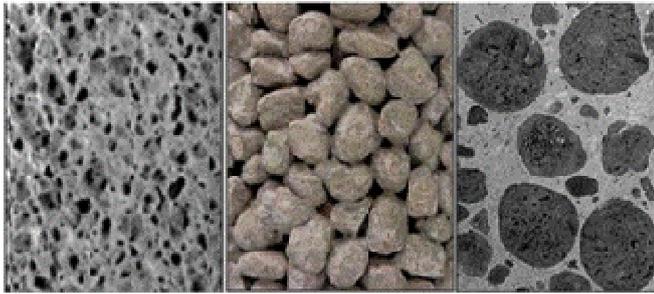
Citation: Aline Alves Milhomem da Silva, Rodrigo da Silva Magalhães, Gizele Saraiva de Sousa, Tarcísio Felipe Vieira de Sousa, Érico Rodrigues Gomes and Gilvan Moreira da Paz. 2021. "Agentes incorporadores de ar e agregados substituintes em concreto celular – Uma revisão", *International Journal of Development Research*, 11, (09), 50006-50012.

INTRODUCTION

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 mecânica ou quimicamente, homogeneamente distribuídas e estáveis (Queiroz et al., 2019). Por essa razão, o uso de concreto leve tem aumentado continuamente, pois possui um benefício primário de reduzir as cargas atuantes em uma estrutura (Yoon et al., 2020) além de ter a vantagem de menor peso próprio, quando produzido pré-moldado, facilitando o manuseio e transporte e possuindo baixa condutividade térmica. Sua origem remonta a 1877, quando Zernikov, produziu uma mistura de cálcio e areia com vapor a alta pressão, embora pouco sólida. Em 1914, Alyswoth e Dyers ativam a argamassa de cálcio e areia com pó de zinco ou alumínio, obtendo a patente do produto denominado "rocha porosa artificial" (Queiroz et al., 2019).

Os concretos leves podem ser produzidos de três formas (Figura 1): a primeira é com a introdução de ar a massa cimentícia, através de espumas, fazendo com que aconteça uma reação que gera bolhas de ar, e desta forma é produzido o concreto aerado ou celular; o concreto sem finos, que é produzido apenas com aglomerante, água e agregados graúdos, onde se produz vazios entre os agregados graúdos e a argamassa; e por último, com o uso de agregados porosos, como a argila expandida por exemplo (Leite et al., 2019). O concreto celular ou concreto espumoso tem sua massa específica reduzida com a incorporação de ar através de bolhas em sua massa cimentícia (Lesovik et al., 2020). Essa incorporação de bolhas se dá através da adição de aditivos incorporadores de ar. Esses aditivos modificam propriedades físicas como a massa específica e a trabalhabilidade, reduzem a resistência à compressão e interferem nas propriedades térmicas dos concretos (Cintra, 2017). O processo de espuma visa idealmente formar um grande número de pequenos vazios individuais (células fechadas) ou redes interconectadas de vazios (células abertas) dentro de um material viscoso (ou seja, uma pasta ou um polímero) (Shi, 2020). O controle da natureza, tamanho e distribuição dos

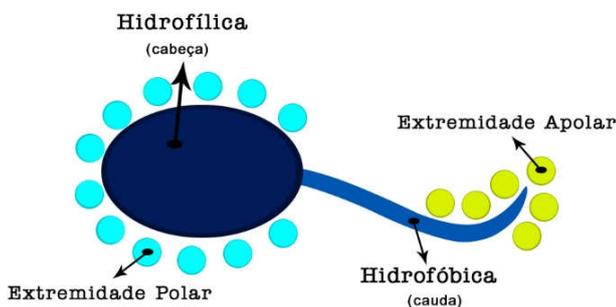
vazios, é o passo mais crítico na produção de materiais espumosos, especificando sua densidade final e resistência.



Fonte: Rossignolo, 2009

Figura 1. Tipos de concreto leve; a) concreto celular b) concreto sem finos c) com agregado leves

Os vazios podem ser produzidos por dois métodos: 1) introduzindo uma fração de volume muito grande de bolhas de ar, geralmente através do uso de surfactantes, 2) por geração de gás, o que pode ser alcançado misturando substâncias liberadoras de gás, como pó de alumínio ou peróxido de hidrogênio, em um cimento como pasta ou argamassa (Shi, 2020). Várias propriedades de concreto leve, como resistência compressiva, módulo de elasticidade, desempenho de absorção de som e isolamento térmico, estão altamente relacionadas às suas características dos poros (Cintra, 2017). Também chamados de formadores de espuma, esses aditivos possuem em sua composição um agente espumante, que é o produto de composição química capaz de produzir bolhas de ar estáveis no interior de pastas de cimento ou argamassas (ABNT, 1992). As bolhas devem resistir aos esforços decorrentes da mistura, lançamento ou bombeamento do material, permanecendo estáveis até o início da pega normal do cimento (ABNT, 1992). Esse agente espumante pode ser de origem sintética ou proteica. A espuma pode, também, ser pré-formada para posterior incorporação à argamassa ou gerada dentro desta por agitação no misturador. Em ambos os casos, devem ser respeitados os prazos de validade dos agentes espumantes especificados pelos fabricantes. Os aditivos incorporadores de ar também são agentes químicos de superfície chamados de tensoativos (ou surfactantes). Os tensoativos são moléculas que apresentam uma parte com característica apolar ligada a uma outra parte com característica polar (Shi, 2020). Dessa forma, esse tipo de molécula é polar e apolar ao mesmo tempo, ou seja, apresentam na mesma molécula uma porção hidrofílica (polar) e outra hidrofóbica (apolar) como é ilustrado na Figura 2.



Fonte: da autora, 2021

Figura 2. Molécula de um aditivo incorporador de ar

Duas características podem ser distinguidas durante o mecanismo de formação de espuma: o encapsulamento do gás no líquido e a vida útil das espumas geradas (Falliano, 2021). Se um agente de espuma erra na fase líquida, as bolhas de ar entram em colapso quase que instantaneamente. A instabilidade das bolhas é uma grande preocupação, especialmente em concretos ultraleves onde a densidade alvo está abaixo de 500 kg/m³ (Dhasindrakrishna, 2020). As espumas, em geral, podem entrar em colapso através de três mecanismos identificados: drenagem, amadurecimento de Ostwald

(desproporção ou coarsening) e coalescência. A drenagem acontece quando o fluido dentro da rede de fronteira se esvai devido à gravidade, levando à separação de fases de gás e fluido. O amadurecimento é a difusão do gás de bolhas menores que estão sob maior pressão para bolhas maiores sob uma pressão mais baixa; assim, as bolhas maiores se expandem com o tempo enquanto as bolhas menores se dissolvem. Coalescência é a fusão de bolhas adjacentes quando o filme entre elas se rompe devido ao envelhecimento (Shi, 2020). Há muitas variáveis relacionadas com o aditivo incorporador de bolhas (tipo e dosagem de aditivo, processo de geração de bolhas de ar, diâmetro, densidade e volume de bolhas, etc.) que influenciam na produção e propriedades no estado fresco e endurecido do concreto celular, que não são determinadas (Silva, 2015). A obtenção do concreto celular espumoso depende principalmente da dosagem do espumígeno (Silva et al., 2018), do volume de espuma gerado (Monteiro et al., 2017) e da relação entre ambos. A baixa resistência mecânica, devido à presença de bolhas de ar tem sido um impedimento para a aplicação em elementos construtivos com fins estruturais (Silva et al., 2018). Para essa finalidade recomenda-se massa específica maior que 1.200 kg/m³ (Monteiro, 2017), relação água/cimento (a/c) de 0,45 a 0,70 e dosagem de cimento de 300 kg/m³ a 450 kg/m³ (Lermen, 2019).

O processo mecânico de se produzir bolhas no concreto celular com agentes espumígenos, é considerado o mais econômico e apresenta menor complexidade por não haver reações químicas (Monteiro et al., 2017). O ar incorporado é de extrema importância à qualidade final do concreto, sendo necessário obter um teor que não reduza significativamente sua resistência mecânica e que garanta sua durabilidade. As bolhas de ar não representam riscos à durabilidade se não estiverem conectadas. Dessa forma, por estarem isoladas, não contribuem para o deslocamento de fluidos através do concreto. Assim, a permeabilidade (que consiste em um dos principais mecanismos de transporte de agentes agressivos no interior do concreto) não é aumentada (Barbar, 2016). Normalmente, para usos mais comuns, o teor de ar incorporado pela espuma pode variar entre 40 e 80%, o que fragiliza e deixa o concreto expandido com uma estrutura celular porosa. Tal formação provoca bolhas de ar com tamanho de 0,1 a 1,5 mm de diâmetro, que inicialmente não teria nenhum problema em relação à permeabilidade, no entanto, a presença delas no meio pode produzir vazios mais consideráveis, principalmente na parte superior ou em contato com as fôrmas, que poderiam ser prejudiciais à durabilidade do concreto (Souza, 2020). A incorporação de modificadores e agregados, o controle de qualidade dos materiais e o fluxo de processos tecnológicos podem melhorar a eficiência dos materiais produzidos (Barbar et al., 2016). Para aumentar essa eficiência, fibras naturais e artificiais podem ser usadas, apesar da redução da resistência à força e ao congelamento (Lermen, 2019). Muitos esforços também têm sido feitos no uso de subprodutos, bem como materiais secundários e de resíduos na mistura para torná-la ambientalmente econômica (Shams, 2021). No entanto, estudos detalhados relacionados à otimização da condição de cura que leva à redução do consumo de energia ainda são bastante limitados. Várias pesquisas se concentraram em como desenvolver concretos espumosos não apenas caracterizados por boas propriedades físicas, mas também com força mecânica apropriada (Souza, 2020). Para atingir esse objetivo, alguns autores modificaram a mistura empregando nanosilica (Liu et al., 2001) e resíduos industriais (Yan et al., 2021), ou incluindo adição mineral com propriedades pozolônicas como cinzas volantes (Kumar et al., 2017), EPS (XIE, 2019), ou escória álcali-ativada (ŞAHIN, 2018). Em outras experimentações científicas, a capacidade flexural é melhorada com diferentes tipos de inclusão das fibras, como fibras de polipropileno (Wang, 2020) e cana-de-açúcar (Makul, 2016). No entanto, todas essas estratégias são inúteis se a espuma usada para fazer o concreto leve não se caracterizar por boas qualidades em termos de densidade, vida útil (intimamente ligada à drenagem) e propriedades químicas (Font, 2017).

Quanto à origem, os agregados leves podem ser classificados em naturais ou artificiais. Os agregados leves naturais são obtidos por meio da extração direta em jazidas, seguida de classificação

granulométrica (Rossignolo, 2009). Esse tipo de agregado leve tem pouca aplicação em concretos estruturais em função da grande variabilidade de suas propriedades e da localização e disponibilidade das jazidas. Como exemplos, temos a pedra-pomes e o tufo vulcânico. Já os agregados leves artificiais são obtidos em processos industriais e, normalmente, são classificados com base na matéria-prima utilizada e no processo de fabricação, como a argila expandida e a escória sinterizada (Rossignolo, 2009). As adições minerais possuem um forte apelo ambiental. Isso se deve principalmente à procedência, como os resíduos de vários processos produtivos tais como: escória de alto-forno (Sharafutdinov, et al., 2019), cinza volante (Demir, 2020), Sílica (Shams, 2021) etc. Esses resíduos são incorporados aos materiais cimentícios, melhorando suas propriedades, e ainda reduzindo o impacto ambiental e a pressão sobre os recursos naturais. (Rudimar, 2017) As adições minerais podem produzir efeitos químicos e físicos na microestrutura do concreto. Como efeito químico, tem-se a sua capacidade de reação com o hidróxido de cálcio, produzido pela hidratação do cimento Portland, na formação adicional do C-S-H (silicato de cálcio hidratado), que é o responsável principal pela resistência das pastas de cimento hidratadas (Rudimar, 2017). A utilização de resíduos minerais vem sendo empregada na indústria do concreto e traz vantagens em âmbitos técnicos, econômicos e ambientais. Ao substituir o cimento por esses resíduos, há a redução do consumo de energia, da poluição do ar gerados por sua produção, e ainda contribui na busca por concretos de alto desempenho (Rudimar, 2017). Diversos resíduos de construção e demolição e subprodutos industriais podem ser escolhidos como matérias-primas para explorar a viabilidade da fabricação de novos agregados leves. O reaproveitamento e desenvolvimento de materiais no local pode diminuir razoavelmente o impacto no meio ambiente e na economia (Shang, 2020). Tendo em vista o exposto, essa revisão tem por objetivo buscar dados estatísticos relacionados aos aditivos incorporadores de ar e aos agregados substituintes mais utilizados neste tipo de concreto, elencando as pesquisas dos últimos cinco anos.

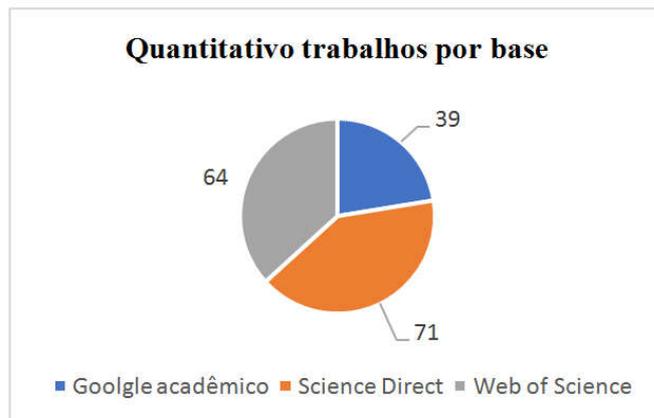
METODOLOGIA

Para o desenvolvimento deste trabalho, quantificou-se através de pesquisas bibliográficas os artigos publicados nos últimos cinco anos nas bases de dados Google Acadêmico, Science Direct e Web of Science. O levantamento de dados foi realizado buscando estudos sobre concreto leve e concreto espumoso. As expressões-chave selecionadas para compor a busca foram utilizadas em português na base Google Acadêmico, e em inglês nas bases Science Direct e Web of Science, tendo como descritores: (a) concreto celular; (b) concreto espumoso; (c) aditivo incorporador de ar; (d) agente espumante; (e) aerated concrete; (f) foam concrete; (g) airincorporating additive; (h) foamingagent. As expressões foram escolhidas de forma a abranger trabalhos relacionados ao concreto celular (a) para que se obtenha um quantitativo das aplicações desses artigos dando ênfase no incorporador de ar utilizado e nos agregados substituintes. Os critérios de inclusão para selecionar os estudos foram: (1) objeto: concreto espumoso; (2) contenha as especificações do aditivo ou agregado utilizado (nome, composição, etc.); (3) trabalho completo disponível para download. Os critérios de exclusão utilizados foram (1) trabalhos que contenham aditivos incorporadores de ar ou agregados sem especificações; (2) trabalhos que sejam resumos expandidos, anais de eventos, outras revisões ou capítulos de livro (3). Após a triagem inicial, os artigos repetidos ou dentro dos critérios de exclusão foram retirados. Feito isso, iniciou-se uma leitura dos resumos para verificar se a obra consultada possuía os parâmetros de interesse para esta revisão, onde os dados relevantes foram extraídos e tabulados. Em seguida iniciou-se uma leitura detalhada para seleção dos estudos que se relacionassem diretamente com o objeto de pesquisa, e os mesmos foram escolhidos para análise completa.

RESULTADOS

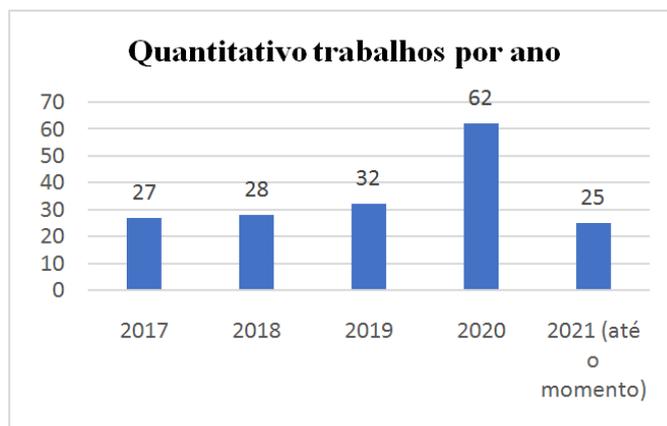
Na busca inicial foram encontrados um total de 1.828 estudos publicados nos últimos cinco anos, onde desse total utilizando os

critérios de inclusão e exclusão foram selecionados 174 trabalhos para esta revisão. Nos gráficos 1 e 2 encontram-se os dados da triagem das buscas. No gráfico 1 é apresentado o total de trabalhos que foram selecionados para compor esta revisão divididos por base, enquanto que no gráfico 2 é apresentado o total de artigos selecionados, divididos por ano de publicação.



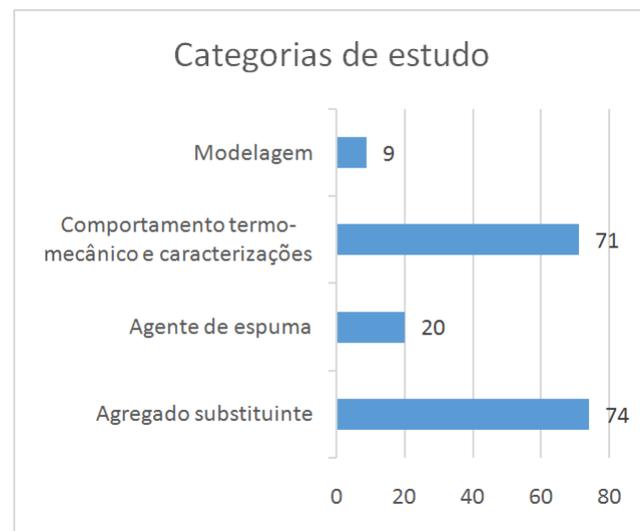
Fonte: da autora, 2021

Gráfico 1. Artigos selecionados para esta revisão divididos por base



Fonte: da autora, 2021

Gráfico 2. Artigos selecionados por ano



Fonte: da autora, 2021

Gráfico 3. Artigos selecionados para esta revisão divididos por categorias de estudo

Tabela 1. Artigos divididos de acordo com o agente de espuma utilizado

Agente de espuma	Quantidade	Referências
Pó de alumínio	7	[31]; [32]; [33]; [34]; [35]; [36]; [37]
Espuma de poliisocianurato	1	[38]
Espuma de fosfato de magnésio	1	[39]
Espuma de bambu	1	[40]
Espuma de vidro granulada	1	[41]
Espuma contendo repelente de água	1	[42]
Espuma de peróxido de hidrogênio	2	[43]; [44]
Espuma de ácidos graxos de coco	1	[29]
Espuma de goma xantana	1	[45]
Sódio alfa olefina sulfonato (ASCO 93)	1	[46]
Espuma de hingot (<i>Balanites aegyptiaca</i>)	1	[47]
Lauril éter sulfato de sódio (SLS)	2	[8]; [48]

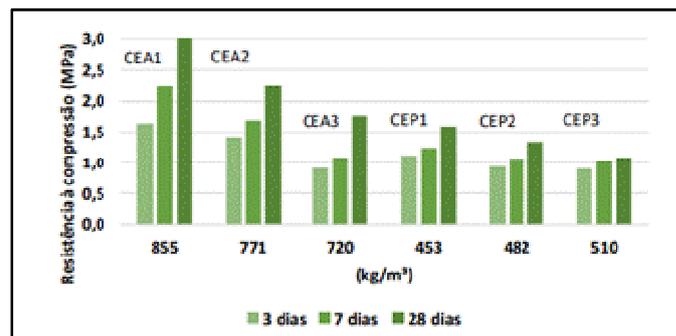
Fonte: da autora, 2021

em categorias que mais se aproximavam da ideia central do estudo. A categoria com mais trabalhos publicados foi sobre agregados substituintes com 74 trabalhos, em seguida vêm os trabalhos que estão na categoria comportamento termomecânico e caracterizações do concreto que obteve 71 trabalhos. Logo após vem os estudos relacionados com o agente espumante, com 20 trabalhos e por último, trabalhos sobre modelagem matemática que somam um total de 9 artigos. Como o enfoque desta revisão são os agentes de espuma e as substituições de agregados nas massas cimentícias, essas duas categorias foram subdivididas na Tabela 1 e no Gráfico 4. Na tabela 1 os vinte artigos foram divididos de acordo com o agente espumante utilizado, e no gráfico 4 os setenta e quatro trabalhos foram divididos de acordo com o agregado utilizado. O agente espumante mais usado nos artigos é o pó de alumínio, seguido da espuma de peróxido de hidrogênio e do SLS (Lauril éter sulfato de sódio). O agregado mais utilizado para compor as massas cimentícias é a cinza volante, seguido do EPS (poliestireno expandido) e da escória álcali-ativada.

DISCUSSÃO

Neste tópico foram feitas algumas considerações a partir do levantamento bibliográfico abordando o agente de espuma e as substituições de agregados feitas em concreto celular, avaliando-se tipo, dosagem, fabricação, origem e resultados mais relevantes. Em suma, foi discutido como os autores relacionaram o aditivo e o agregado em seus estudos.

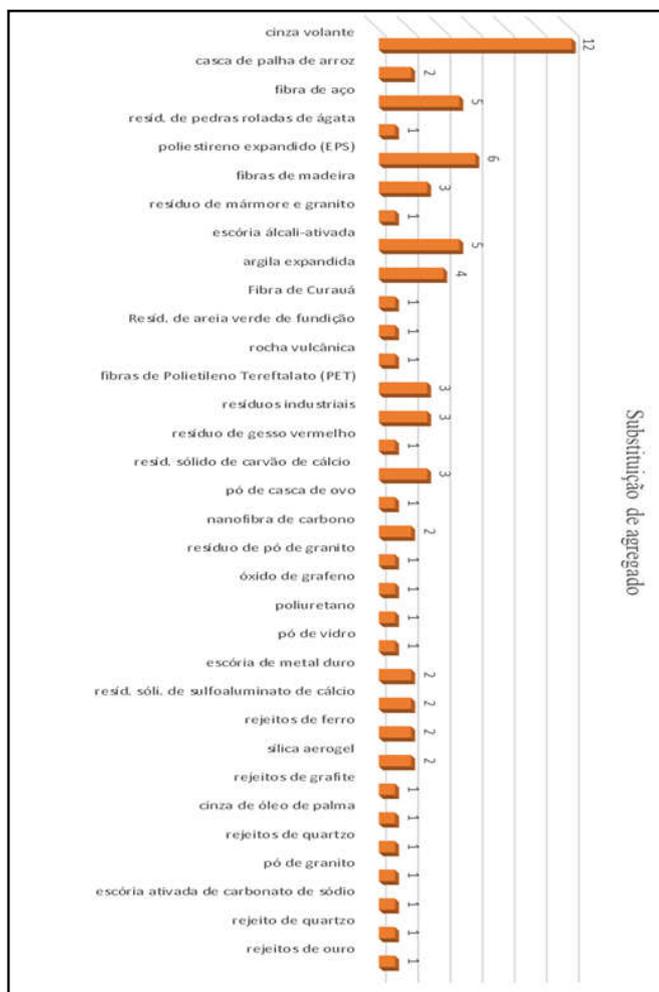
Análise I: [16] produziu um concreto celular utilizando escória álcali-ativada, onde sua pesquisa teve como objetivo a avaliação do comportamento deste concreto substituindo a areia pelo uso do agregado ultraleve de poliestireno expandido (EPS) como fonte redutora de massa específica. Foram avaliadas as propriedades no estado plástico, realizados ensaios de resistência à compressão e velocidade de propagação de onda ultrassônica, além de ensaios de absorção, análise termogravimétrica e difração de raios X. Os resultados mostraram massa específica aparente abaixo de 800 kg/m³ e resistência mecânica de até 3 Mpa (Gráfico 5), indicando que, de forma geral, do ponto de vista da indústria da construção civil, o agregado pesquisado é uma alternativa viável e vantajosa quando aplicado em concreto celular, com uma produção sustentável e ecologicamente correta.



Dados: CEA (concreto celular escória) 1: (a/agl: 0,38); 2: (a/agl: 0,42); 3: (a/agl: 0,46)
 CEP (concreto celular escória com EPS) 1: (a/agl: 0,38); 2: (a/agl: 0,42); 3: (a/agl: 0,46)
 Fonte: da autora, 2021

Gráfico 5. Resultados encontrados por [16] de resistência à compressão e massa específica aparente. CEA (concreto celular escória). CEP (concreto celular escória com EPS)

Para todas as amostras, (Souza, 2020) utilizou três fatores água/aglomerante (a/agl): 0,38, 0,42 e 0,46. A substituição do poliestireno expandido promoveu uma média de redução de massa sobre volume em torno de 30%. O uso do poliestireno expandido como agregado leve em concreto pode ser feito por meio da utilização de pérolas industrializadas ou através do reaproveitamento de material descartado, o qual é previamente moído ou triturado antes de ser adicionado ao composto cimentício (Da Silva Oliveira, 2018). As propriedades mecânicas do material dependerão de uma série de fatores, incluindo o tipo utilizado, diâmetro e regularidade da



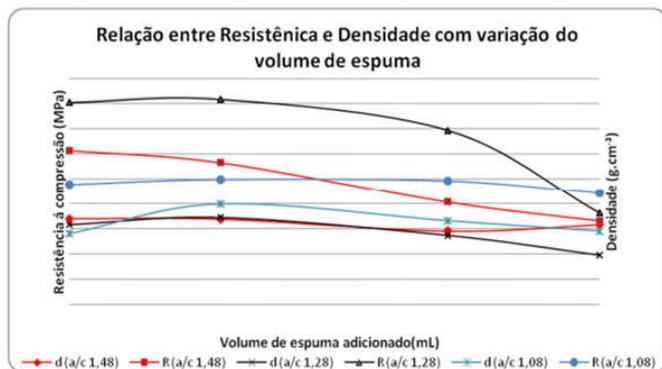
Fonte: da autora, 2021

Gráfico 4. Artigos divididos de acordo com o agregado utilizado

A maior parte dos trabalhos selecionados foram da base de dados Science Direct com 77 artigos, e a que obteve menos publicações selecionadas foi a base Google Acadêmico, com 42. O ano onde houve mais publicações foi o de 2020 com 62 artigos, e o com menos publicações foi o de 2017 com 27 trabalhos selecionados (o ano de 2021 não fez parte desta contagem pois ainda se encontra em andamento). O Gráfico 3, trata a respeito das aplicações dos artigos e temas centrais dos mesmos, onde os 174 artigos foram subdivididos

superfície de suas partículas. Em relação ao aglomerante, a massa específica dos concretos celulares de cimento escória álcali-ativados, foi ligeiramente maior do que os produzidos com cimento Portland. As amostras produzidas com escória: CEA1, CEA2, CEA3, CEP1, CEP2 e CEP3 apresentaram respectivamente, uma massa específica fresca de 14,27%, 15,74%, 19,59%, 0,90%, 4,80%, 10,94%, superior as mesmas amostras produzidas com cimento Portland (CCA1, CCA2, CCA3, CCP1, CCP2 e CCP3). Conforme os resultados, (Souza, 2020) verificou que a areia proporciona a maior massa específica aos concretos, como esperado em razão da acentuada densidade do material. A substituição do agregado miúdo quartzoso pelo EPS promoveu uma redução de 40,00%, 30,97%, 23,54%, 47,02%, 37,49% e 29,07%, respectivamente nas amostras CCA1, CCA2, CCA3, CEA1, CEA2 e CEA3. Alcançando uma média de redução de massa sobre volume de 34,68%.

Análise II: (Rudimar, 2017) Utilizou um agente espumante natural, produzindo blocos de concreto celular usando aditivo espumígeno de ácidos graxos de coco, e avaliou a possibilidade da utilização do resíduo de pedras roladas de ágata na fabricação dos blocos. O agente incorporador de ar foi obtido a partir de uma mistura de dois espumígenos derivados do fruto do coco, a Dietanolamida de Ácidos Graxos e o Coco Amida Propil Betaina, cuja natureza química é a Alcanolamidas de Ácidos Graxos de Coco, obtido pela reação de condensação do óleo de coco com a dimetilpropilamina, um surfactante anfótero, sendo que seus componentes ativos atraem tanto cargas positivas quanto negativas, conforme o pH do meio. Em pH alcalino, comportam-se como aniônicos, em pH ácido como catiônicos. Para formulação da espuma, (Rudimar, 2017) utilizou a mistura de duas partes da Dietanolamida de Ácido Graxo de Coco e uma parte da Coco Amino Propil Betaina (na proporção de 1:3). [29] estudou a composição da espuma, a granulometria do resíduo, o teor de água e o tempo de mistura, moldando 36 corpos de prova, com diferentes volumes de ar incorporado, divididos em três grupos. As amostras foram analisadas quanto à resistência à compressão, densidade e distribuição das bolhas de ar. Os resultados demonstraram que a melhor relação foi a do Grupo II (relação a/c de 1,28), que apresentou densidade de 430 Kg/m³, e resistência de 0,92 Mpa.



Fonte: Rudimar, 2017

Gráfico 6. Comportamento da resistência em relação a densidade e volume de espuma adicionado

Quando se faz a correlação entre a densidade e a resistência apresentada no gráfico 6, pode-se observar que a resistência à compressão na argamassa aerada não corresponde diretamente ao valor de densidade, como esperado. A interpretação deste gráfico sugere que há outros aspectos relevantes, tais como, tamanho e distribuição das bolhas de ar e relação a/c. Sendo assim, este gráfico reforça os resultados verificados por (Rudimar, 2017) no Grupo II, onde a relação a/c em 1,28 apresentou menor densidade e maior resistência para a maioria das adições de espumas. Contudo, cabe salientar que o melhor resultado dentro do grupo está para a amostra com adição de 9g de espuma, a qual apresentou menor densidade (430 Kg/m³) e 1,07 MPa. Assim, acredita-se que, com estudo complementar, é plenamente viável o atendimento da resistência normalizada com processo de cura em 28 dias, em temperatura e

umidade ambiente. Concluiu-se também que a resistência à compressão também tem grande dependência da quantidade de água que é adicionada na hidratação dos materiais (Rudimar, 2017). Um excesso de água causa caminhos preferenciais dentro da argamassa, por onde a água em excesso extravasa, deixando esta região com baixa resistência mecânica. Além disso, um excesso de bolhas de ar também causa uma queda acentuada na resistência à compressão, pois geram espaços vazios que, ao mesmo tempo, podem propiciar um melhor abatimento na transmissão som e calor e não oferecer resistência mecânica a cargas mentos sistemáticos.

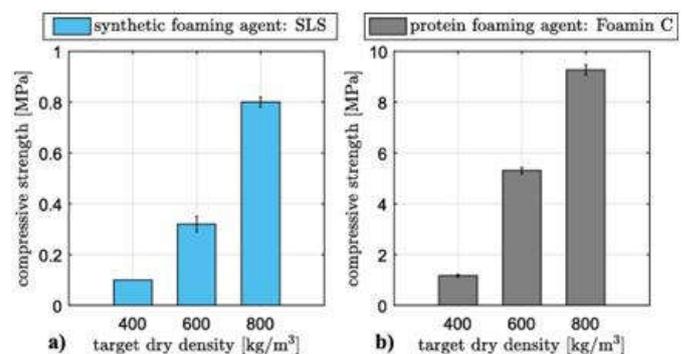
Análise III: (Falliano, 2021) inovou ao confeccionar um gerador de espuma otimizado (Figura 3), realizando um estudo comparativo sobre aspectos que influenciam espumas e propriedades de concreto espumado, desde a geração de espuma até a resistência compressiva do material cimentício leve e ultraleve.



Fonte: Falliano, 2021

Figura 3. Gerador de espuma otimizado: a) visão geral; b) detalhe da bomba de dosagem automática para a concentração do agente de espuma; c) detalhe do redutor de pressão de ar; d) detalhe para a regulação do fluxo de ar.

O estudo de (Falliano, 2021) forneceu explicações das diferenças entre a resistência compressiva do concreto leve espumoso obtido com espumas geradas por meio de agentes de proteínas e espuma sintética. O autor utilizou um agente de espuma proteico produzido por uma empresa italiana, que além de água, é composto por 25% de proteínas hidráulicas e 4% de sais minerais; 1,5% deste último, são metais, como cloreto de zinco, cloreto de magnésio e sulfato de ferro. O aditivo LSL (lauril éter sulfato de sódio), usado como espuma sintética, é amplamente utilizado em vários setores industriais e é obtido da reação entre ácido láurico e anidrido sulfúrico, junto com hidróxido de sódio (Falliano, 2021). Os resultados mostram que as espumas geradas com o agente de espuma de proteínas têm características mais adequadas para produzir concreto espumado, graças à vida útil significativamente maior em comparação com as espumas produzidas com o agente de espuma sintética (Gráfico 7). Estes últimos são caracterizados por valores de drenagem muito elevados mesmo após alguns minutos de sua geração.

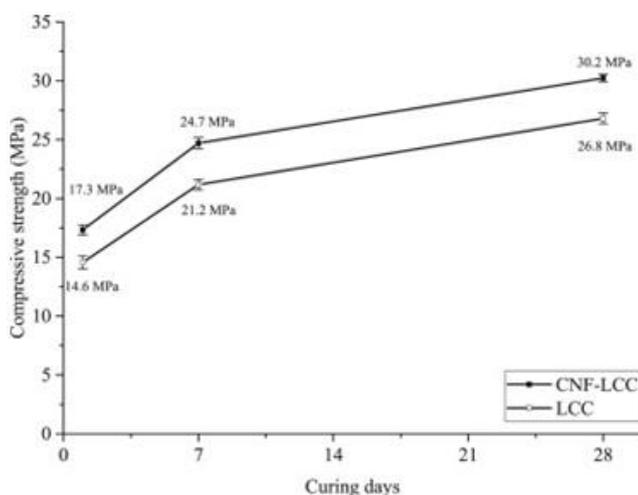


Fonte: Falliano, 2021

Gráfico 7. Resultados obtidos por [8]: concretos leves produzidos com espumas geradas utilizando o agente de espuma sintética (a) e o agente de espuma proteico (b)

A investigação feita por [8] mostrou um comportamento decididamente diferente das espumas geradas com os dois agentes de espuma quando misturados com a pasta cimentada. Esse comportamento atribuído às diferentes interações entre as moléculas de surfactantes de proteínas e sintéticas com as partículas de cimento, é crucial para entender as enormes diferenças em termos de força compressiva do concreto espumado produzido. Essas considerações permitem compreender melhor as distintas propriedades dos concretos espumados quando as espumas foram geradas com agentes de espuma sintética ou proteína.

Análise IV: (Wang, 2020) Utilizaram um concreto de desempenho produzido por uma baixa relação água/cimento, incorporando nanofibras de carbono na mistura base. Foi produzido um composto cimentício leve com 1500 kg/m³ para uso estrutural. O concreto celular incorporado com nanofibras de carbono apresentou excelentes propriedades mecânicas em comparação com o concreto celular tradicional, que é promissor para aplicações estruturais. Além disso, propriedades incluindo a resistência à redução precoce e durabilidade também foram superiores. Atualmente, o uso de nanofibras de carbono e nanotubos de carbono em material cimentício tornou-se cada vez mais popular para melhorar ainda mais as propriedades mecânicas do concreto. Ambos, são materiais altamente estruturados baseados em anéis de grafeno e famosos por suas extraordinárias propriedades mecânicas, e de condutividade térmica/elétrica (Wang, 2020). Os efeitos se concentram principalmente na pasta de cimento, argamassa e concreto de desempenho. As nanofibras de carbono e nanotubos de carbono podem melhorar efetivamente as propriedades de dureza da fratura, ductilidade, durabilidade e resistência à encolhimento, podem atuar para acelerar o processo de hidratação e gerar mais hidrato de silicato de cálcio (C-S-H). Além disso, as nanofibras de carbono e nanotubos de carbono podem funcionar como pontes entre rachaduras ou vazios para melhorar a resistência à rachadura e a ductilidade. O principal desafio do uso desses materiais em bases cimentícias é obter uma dispersão estável e homogênea, pois eles têm forte tendência a formar aglomeração devido à sua grande área de superfície e às forças de Van der Waals altas (Wang, 2020). Isso causa distribuição heterogênea e gera muitos defeitos, resultando na degradação dos compósitos. O desenvolvimento de força compressiva nas idades de 7, 14 e 28 dias é apresentado no Gráfico 8.



Fonte: Falliano, 2021

Gráfico 8. Resultados de resistência a compressão obtidos por [50]

Os resultados foram satisfatórios pois o concreto com incorporação de nanofibras de carbono apresentou uma resistência a compressão de 30,2 Mpa. Isso é atribuído pela criação de uma alta resistência e bordas mais densas (paredes de poros) no concreto celular. Além disso, observa-se que o concreto aumentou a força compressiva em 1, 7 e 28 dias em 18,5%, 16,5% e 12,7%, respectivamente indicando que a força compressiva de 1 dia teve o maior aumento [50]. Isso é atribuído à função de enchimento das fibras para tornar a estrutura das paredes de poros mais densa, reduzindo o tamanho e o volume de

poros capilares e micro vazios, especialmente na zona de transição interfacial. [50] relataram que as fibras poderiam funcionar como locais de nucleação devido à sua alta energia superficial e os produtos de hidratação depositariam em sua superfície, durante o qual uma maior quantidade de hidrato de cálcio (C-S-H) poderia ser produzida no estágio inicial de hidratação.

CONCLUSÕES

Ao concluir esta revisão percebe-se os principais aspectos atuais acerca do concreto celular e as tendências de agregados e adições à massa cimentícia. Observa-se as incorporações de distintos materiais com o objetivo de caracterizar melhoramento mecânico ao material e obter economias ambientais e energéticas ao longo do tempo. Pontuou-se também os avanços científicos e tecnológicos que este tipo de concreto traz a indústria e quais características usuais deve-se manter no material.

AGRADECIMENTOS

Ao PPGEM/IFPI (Programa de Pós-Graduação em Ciência e Engenharia de Materiais), e ao Grupo Kalfix pelo apoio financeiro para publicação deste estudo.

REFERÊNCIAS

- ABNT- Associação Brasileira de Normas Técnicas / NBR 12645: Execução de paredes de concreto celular espumoso moldadas no local: procedimento. Rio de Janeiro, 1992.
- Barbar, Joseph Salem. Influência do teor de ar incorporado no desempenho de concretos com diferentes teores de agregados. Tese (Doutorado - Programa de Pós-Graduação em Arquitetura e Urbanismo) / Universidade de São Paulo - São Carlos, 2016.
- Calle Zelaya, Percy Renzo. Análisis y diagnóstico del polvo de aluminio sobre el asentamiento en un concreto ligero, en la provincia de Huaura-2018. 2019.
- Cintra, L. B. Avaliação das propriedades térmicas de concretos com ar incorporado. Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal de Uberlândia, 2017.
- Da Silva Oliveira [et al.] Uso do poliestireno expandido como agregado em concreto leve: conceituação, aplicações e estado da arte. Revista Vértices, Campos dos Goytacazes/RJ, v.20, n.3, set./dez, 2018.
- Demir, Ilhami [et al.] Microstructural, physical and mechanical properties of aerated concrete containing fly ash under high temperature and pressure. Revista Romana de Materiale, v. 50, n. 2, p. 240-249, 2020.
- Dhasindrakrishna, K. [et al.] Effect of yield stress development on the foam-stability of aerated geopolymer concrete. Cement and Concrete Research, v. 138, p. 106233, 2020.
- Falliano, Devid [et al.] A simple optimized foam generator and a study on peculiar aspects concerning foams and foamed concrete. Construction and Building Materials, v. 268, 2021.
- Font, Alba [et al.] Geopolymer eco-cellular concrete (GECC) based on fluid catalytic cracking catalyst residue (FCC) with addition of recycled aluminium foil powder. Journal of Cleaner Production, v. 168, p. 1120-1131, 2017.
- Ikponmwo, EFE [et al.] Structural behaviour of bamboo-reinforced foamed concrete slab containing polyvinyl wastes (PW) as partial replacement of fine aggregate. Journal of King Saud University-Engineering Sciences, v. 29, n. 4, p. 348-355, 2017.
- Kanchanapiya, Premrudee; Methacanon, Pawadee; Tantisattayakul, Thanapol. Techno-economic analysis of light weight concrete block development from polyisocyanurate foam waste. Resources, Conservation and Recycling, v. 138, p. 313-325, 2018.
- Kejkar, Rupali B. [et al.] Performance Evaluation of Cost-Effective Non-autoclaved Aerated Geopolymer (NAAG) Blocks. Arabian Journal for Science and Engineering, v. 45, p. 8027-8039, 2020.

- Khwairakpam, Selija; Gandhi, Indu Siva Ranjani. Assessment of the potential of a naturally available foaming agent for use in the production of foam concrete. *Materials Today: Proceedings*, v. 32, p. 896-903, 2020.
- Kumar, E. Muthu; Ramamurthy, K. Influence of production on the strength, density and water absorption of aerated geopolymer paste and mortar using Class F fly ash. *Construction and Building Materials*, v. 156, p. 1137-1149, 2017.
- Leite, Carolina Gonçalves [et al.] Estudo de dosagem e avaliação de concreto celular espumoso com adição de cerâmica e cinza da biomassa de eucalipto com fins estruturais / Trabalho de Conclusão de Curso. UFVJM: Teófilo Otoni, 2019.
- Lermen, Richard Thomas [et al.] 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.
- Lesovik, Valery [et al.] Improving the behaviors of foam concrete through the use of composite binder. *Journal of Building Engineering*, v. 31, 2020.
- Liu, Peng [et al.] Preparation and experimental study on the thermal characteristics of lightweight prefabricated nano-silica aerogel foam concrete wallboards. *Construction and Building Materials*, v. 272, p. 121895, 2021.
- Liu, Yiquan [et al.] Autoclaved aerated concrete incorporating waste aluminum dust as foaming agent. *Construction and Building Materials*, v. 148, p. 140-147, 2017.
- Ma, Cong; Chen, Bing. Experimental study on the preparation and properties of a novel foamed concrete based on magnesium phosphate cement. *Construction and Building Materials*, v. 137, p. 160-168, 2017.
- Ma, Cong; Chen, Bing. Properties of foamed concrete containing water repellents. *Construction and building materials*, v. 123, p. 106-114, 2016.
- Makul, Natt; Sua-Iam, Gritsada. Characteristics and utilization of sugarcane filter cake waste in the production of lightweight foamed concrete. *Journal of cleaner production*, v. 126, p. 118-133, 2016.
- Makul, Natt; Sua-Iam, Gritsada. Characteristics and utilization of sugarcane filter cake waste in the production of lightweight foamed concrete. *Journal of cleaner production*, v. 126, p. 118-133, 2016.
- Monteiro, Eliana Cristina Barreto; Colaço, Jairo Mariz; da Costa Silva, Angelo Just. Avaliação comparativa do comportamento mecânico de concretos leves com ar incorporado. *Revista Técnico-Científica*, v. 1, 2017.
- Pasupathy, Kirubajiny [et al.] Influence of recycled concrete aggregate on the foam stability of aerated geopolymer concrete. *Construction and Building Materials*, v. 271, 2021.
- Queiroz, Fábio Conrado de. Castro, Nuria Fernandez de. Concreto celular com Ecofíler de resíduos de mármore e granito. VIII Jornada do Programa de Capacitação Institucional – PCI/CETEM, 2019.
- Ricciotti, Laura [et al.] Geopolymer-based hybrid foams: Lightweight materials from a sustainable production process. *Journal of Cleaner Production*, v. 250, p. 119588, 2020.
- Rossignolo, João Adriano. Concreto leve estrutural: produção, propriedades, microestrutura e aplicações / João Adriano Rossignolo. - São Paulo: PINI, 2009
- Rudimar, Pedro. Produção de blocos de concreto celular usando espumígeno de ácidos graxos de coco e resíduos de pedras roladas de ágata. Dissertação (Programa de Pós Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais - UFRGS). Porto Alegre, 2017.
- Şahin, Murat; Erdoğan, Sinan Turhan; Bayer, Özgür. Production of lightweight aerated alkali-activated slag pastes using hydrogen peroxide. *Construction and Building Materials*, v. 181, p. 106-118, 2018.
- Şahin, Murat; Erdoğan, Sinan Turhan; Bayer, Özgür. Production of lightweight aerated alkali-activated slag pastes using hydrogen peroxide. *Construction and Building Materials*, v. 181, p. 106-118, 2018.
- Sebaibi, Nassim [et al.] Optimization of non-autoclaved aerated insulating foam using bio-based materials. *Construction and Building Materials*, v. 262, p. 120822, 2020.
- Shams, Taban [et al.] Production of autoclaved aerated concrete with silica raw materials of a higher solubility than quartz part I: Influence of calcined diatomaceous earth. *Construction and Building Materials*, v. 272, p. 122014, 2021.
- Shams, Taban [et al.] Production of autoclaved aerated concrete with silica raw materials of a higher solubility than quartz part I: Influence of calcined diatomaceous earth. *Construction and Building Materials*, v. 272, p. 122014, 2021.
- Shang, Xiaoyu; LI, Jiangshan; Zhan, Baojian. Properties of sustainable cellular concrete prepared with environment-friendly capsule aggregates. *Journal of Cleaner Production*, v. 267, p. 122018, 2020.
- Sharafutdinov, Eldar [et al.] Frost resistance number to assess freeze and thaw resistance of non-autoclaved aerated concretes containing ground granulated blast-furnace slag and micro-silica. *Materials*, v. 12, n. 24, p. 4151, 2019.
- Shi, Jinyan [et al.] Preparation and characterization of lightweight aggregate foamed geopolymer concretes aerated using hydrogen peroxide. *Construction and Building Materials*, v. 256, p. 119442, 2020.
- Shi, Jinyan [et al.] Preparation and characterization of lightweight aggregate foamed geopolymer concretes aerated using hydrogen peroxide. *Construction and Building Materials*, v. 256, p. 119442, 2020.
- Shi, Jinyan [et al.] Preparation and characterization of lightweight aggregate foamed geopolymer concretes aerated using hydrogen peroxide. *Construction and Building Materials*, v. 256, p. 119442, 2020.
- Silva, Cledson André de Oliveira [et al.] Influência do aditivo espumígeno na dosagem e nas propriedades do concreto celular aerado. *Matéria (Rio de Janeiro)*, v. 23, n. 1, 2018.
- Silva, Cledson André de Oliveira. Estudo de dosagem e avaliação de concreto celular com fins estruturais. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Centro de Tecnologia, PPGEC - Universidade Federal de Alagoas: Maceió, 2015.
- Souza, M. T. [et al.] Electrolytes' influence on foamability and foam stability of cement suspensions. *Construction and Building Materials*, v. 157, p. 363-371, 2017.
- Souza, Tacila Bertolino De. Produção de concreto celular utilizando escória álcali ativada. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Universidade Federal de Pernambuco: Recife - PE, 2020.
- Vaganov, Victor [et al.] Effect of CNT on microstructure and mineralogical composition of lightweight concrete with granulated foam glass. *Procedia Engineering*, v. 172, p. 1204-1211, 2017.
- Veliz Barreto, Alex Mauricio; Vásquez Llerena, José Luis. Obtención de concreto ligero estructural mediante el uso de Aditivos. 2018.
- Wang, SU; [et al.] Performance of lightweight cementitious composite incorporating carbon nanofibers. *Cement and Concrete Composites*, v. 109, p. 103561, 2020.
- Wang, Yijiang [et al.] Thermo-mechanical and moisture absorption properties of fly ash-based lightweight geopolymer concrete reinforced by polypropylene fibers. *Construction and Building Materials*, v. 251, p. 118960, 2020.
- XIE, YUE [et al.] Preparation and properties of ultra-lightweight EPS concrete based on pre-saturated bentonite. *Construction and Building Materials*, v. 195, p. 505-514, 2019.
- Yan, Dongming [et al.] CO₂ Pretreatment to Aerated Concrete with High-Volume Industry Wastes Enables a Sustainable Precast Concrete Industry. *ACS Sustainable Chemistry & Engineering*, v. 9, n. 8, p. 3363-3375, 2021.
- Yoon, Jinyoung [et al.] Characterization of Porous Cementitious Materials Using Microscopic Image Processing and X-ray CT Analysis. *Materials*, v. 13, n. 14, p. 3105, 2020.
- Zhu, Han [et al.] Experimental study on performance improvement of anionic surfactant foaming agent by xanthan gum. *Building and Construction Materials*, v. 230, p. 116993, 2020.