

Resíduos de usinas de concreto como material alternativo para produção de produtos cimentícios: mapeamento sistemático

Concrete plants waste as an alternative material to produce cement products: systematic mapping

*Walter Batista Bonfim(1); Igor Mazon Carvalho(2); Rafael de Paiva Moura(3);
Lucas Salomão Rael de Moraes(4); Heber Martins de Paula(5)*

1 Universidade Federal de Goiás, Goiânia, GO, Brasil. E-mail: walter_bonfim@ufg.br

2 Universidade Federal de Goiás, Goiânia, GO, Brasil. E-mail: igor_m_carvalho@hotmail.com

3 E-mail: rafaeldepaiva.eng@hotmail.com

4 Universidade Federal de Catalão, Catalão, GO, Brasil. E-mail: lucas.salomao@ufg.br

5 Universidade Federal de Catalão, Catalão, GO, Brasil. E-mail: heberdepaula@ufg.br

Revista de Engenharia Civil IMED, Passo Fundo, vol. 8, n. 1, p. 109-127, janeiro-junho, 2021 - ISSN 2358-6508

[Recebido: maio 22, 2020; Aceito: setembro 18, 2020]

DOI: <https://doi.org/10.18256/2358-6508.2021.v8i1.4109>

Sistema de Avaliação: *Double Blind Review*

Editora: Richard Thomas Lermen

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

Resumo

A lama residual de concreto (LRC) é um resíduo cimentício proveniente do tratamento da água residuária gerada durante o processo de lavagem de pátios e caminhões betoneira em usinas dosadoras. Este resíduo é composto basicamente por água, agregados, pasta de cimento e aditivos utilizados para produção de concreto. Devido as suas características como, por exemplo, elevado pH e alto teor de sólidos suspensos, há de se ter um manejo adequado deste material, visto que, conforme a Resolução CONAMA nº 430, o lançamento de efluentes em solo não poderá representar riscos de poluição às águas superficiais e subterrâneas. Nota-se que nos últimos anos, tanto a academia, quanto a indústria, têm buscado encontrar soluções que reduzam o impacto de algumas atividades produtivas sobre o meio ambiente. Assim sendo, este artigo tem como objetivo apresentar um panorama das pesquisas relacionadas com a incorporação da lama residual de concreto em produtos cimentícios. Para tanto, foi realizado um mapeamento sistemático da literatura através da base de dados Periódicos CAPES utilizando as *strings* de busca “concrete sludge” e “fresh concrete waste”, de forma a encontrar os principais estudos relacionados com a vertente estudada. Assim, através do mapeamento realizado foi possível perceber que, quando comparado com outros tipos de resíduos, o estudo da lama residual de concreto (LRC) ainda é recente e os impactos da sua utilização ainda não foram completamente esclarecidos, ressaltando assim a necessidade de novas pesquisas na área.

Palavras-chave: Lama residual de concreto. Usinas dosadoras de concreto. Resíduos. Mapeamento sistêmico.

Abstract

Concrete waste sludge is a cementitious waste from the treatment of wastewater generated during the washing process of concrete mixer yards and trucks in metering plants. This waste is basically composed of water, aggregates, cement paste and additives used for concrete production. Due to its characteristics, such as high pH and high suspended solids content, this material must be properly managed, since, according to CONAMA Resolution nº. 430, the discharge of effluents into the soil cannot pose pollution risks to surface and groundwater. In recent years, both academia and industry have sought to find solutions that reduce the impact of some productive activities on the environment. Therefore, this article aims to present an overview of research related to the incorporation of concrete sludge in cement products. For this, a systematic literature mapping was performed through the CAPES Periodic database using the search strings “concrete sludge” and “fresh concrete waste”, in order to find the main studies related to the studied slope. Thus, through the mapping performed it was possible to realize that, when compared to other types of waste, the study of concrete residual sludge (LRC) is still recent and the impacts of its use have not been completely clarified, thus highlighting the need for further research. in the area.

Keywords: Concrete waste sludge. Concrete batching plants. Waste. Systemic mapping.

1 Introdução

A indústria da construção civil tem sido reconhecida como uma atividade responsável por grande degradação ambiental, gerando impactos através do consumo elevado de energia e recursos não renováveis, emissão de gás carbônico (CO₂) e alta geração de resíduos sólidos (SILVA, 2016). Como o concreto é o material mais utilizado na indústria da construção, a sustentabilidade deste setor pode ser melhorada minimizando os impactos ambientais inerentes da sua produção (KISKU et al., 2017).

Segundo Sealey, Phillips e Hill (2001), a devolução de concreto e a lavagem de pátios e caminhões betoneira são as principais fontes geradoras de resíduos dentro de uma usina. No Brasil, a destinação destes resíduos é o uso em melhorias de infraestrutura dentro da própria empresa (VIEIRA; FIGUEIREDO, 2013) e encaminhar a água residual de concreto para um sistema de tratamento de controle de partículas finas em suspensão (PAULA, ILHA; 2014). A realização desse tratamento gera uma lama precipitada no fundo de tanques devido ao processo de decantação, também chamada de lama residual de concreto (LRC). Periodicamente, este resíduo é retirado dos tanques e destinado a baias de secagem, para posterior disposição em aterros sanitários (SEALEY; PHILLIPS; HILL, 2001).

Alguns estudos foram desenvolvidos com o intuito de aproveitar este resíduo em produtos cimentícios, sendo que a utilização mais comum tem sido reincorporar a lama residual de concreto no estado seco (LRC-S) como agregado graúdo ou miúdo para produção de novos concretos. No entanto, estudos propondo a sua utilização para produção de blocos de concreto e argamassas de cimento Portland também foram encontrados.

A partir das discussões apresentadas, este artigo tem como objetivo apresentar um panorama das pesquisas que vêm sendo desenvolvidas a respeito da incorporação da lama residual de concreto em produtos de cimento, evidenciando os impactos e os fatores que afetam a sua implementação.

2 Método ou Programa Experimental

A revisão de literatura foi realizada através de um mapeamento sistemático (mapping study), conforme método adotado por Paula e Ilha (2016). As buscas foram realizadas na base de dados presente no Portal de Periódicos da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) disponibilizadas pelo sistema da Universidade Federal de Goiás. Para a realização das buscas foram utilizadas as seguintes strings: (a) “concrete sludge” e (b) “fresh concrete waste”. Estas expressões foram escolhidas de forma a abranger estudos relacionados com a utilização da lama residual de concreto na construção civil.

Realizadas as buscas iniciais, restringiram-se os resultados quanto ao tipo de publicação (artigos revisados por pares). A próxima etapa consistiu em analisar os títulos e resumos aderentes, de modo a excluir aqueles trabalhos que não se relacionavam diretamente ao tema em estudo (PAULA; ILHA, 2016). Em seguida, foi iniciada a etapa chamada de *snowball sampling*, que consistiu em analisar as referências utilizadas pelos artigos selecionados, buscando possíveis estudos que não foram detectados nas buscas realizadas.

Já a etapa de análise e discussão dos resultados obtidos foi realizada organizando os dados em gráficos e tabelas, para assim, apresentar o resumo dos resultados encontrados, o ano de publicação e os países onde foram realizadas cada pesquisa. Por fim, foi iniciada a revisão de literatura propriamente dita, com o enfoque voltado para as principais características do material estudado e para os principais fatores que impactam a sua utilização, comparando e discutindo os estudos já realizados.

Vale ressaltar ainda que, além dos artigos obtidos através do mapeamento sistemático da literatura, foram utilizados também livros, normas e outros artigos, nacionais ou internacionais, relevantes ao estudo, conforme proposto por Paula e Ilha (2016).

3 Resultados e Discussões

O resumo dos resultados obtidos após a realização das etapas propostas para o mapeamento sistemático está apresentado na Tabela 1. Avaliando a representatividade das expressões utilizadas, a busca “*fresh concrete waste*” e “*concrete sludge*” apresentaram, respectivamente, uma porcentagem de artigos com título e resumo aderentes de 46,43% e 15,07%. Assim, foi possível verificar que a expressão “*Fresh concrete waste*” é bastante específica e utilizada, predominantemente, em trabalhos aderentes à esta pesquisa. Vale destacar também a eficiência do método proposto, visto que, de um total de 101 artigos inicialmente encontrados, selecionaram-se apenas 26 estudos aderentes, reduzindo assim em aproximadamente 75% o número de artigos.

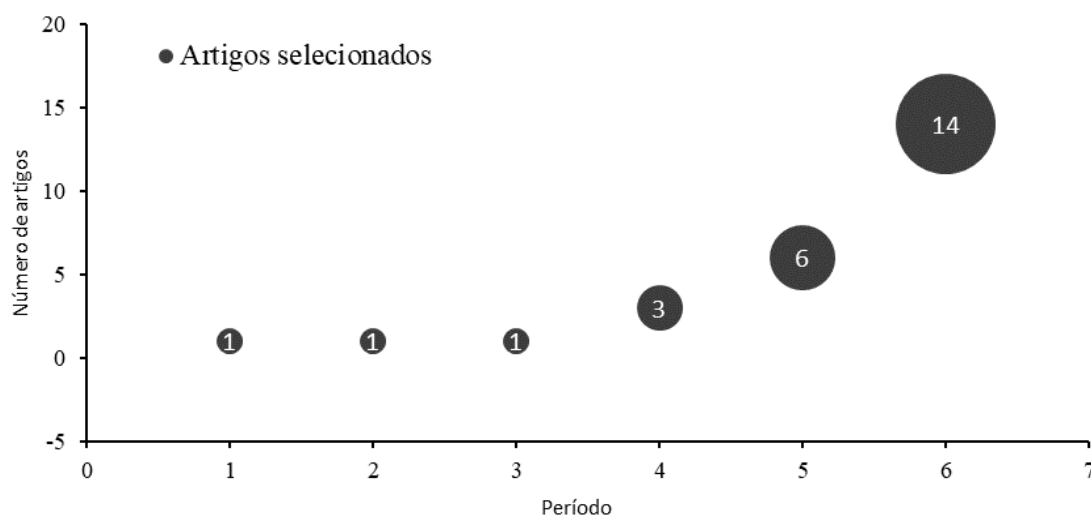
Tabela 1. Resumo dos resultados obtidos no mapeamento

Critérios utilizados	Expressões-chave	
	“concrete sludge”	“fresh concrete waste”
Resultados obtidos		
Número inicial de artigos	73	28
Artigos selecionados após análise de títulos	16	20
Artigos selecionados após leitura dos resumos	11	13
Artigos repetidos entre as buscas		2
<i>Snowball sampling</i>		4
Total		26

Fonte: Próprio autor.

Buscando avaliar o desenvolvimento das pesquisas ao longo do tempo, foi elaborada a Figura 1, identificando a evolução de estudos realizados em função das expressões-chave utilizadas. Verifica-se um acentuado crescimento de publicações a partir do ano de 2007 e que continua até os dias atuais. Este comportamento pode estar relacionado com o chamado Protocolo de Quioto, estabelecido durante a 3ª Conferência das Partes realizada em Quioto, Japão, em 1997. Nesta conferência foi estabelecido que os países desenvolvidos deveriam reduzir as emissões anuais de gases de efeito estufa (GEE) para um nível 5,2% inferior ao observado em 1990 durante o primeiro período de compromisso, entre 2008 e 2012 (UNITED NATIONS FRAMEWORK CONVENTION ON CLIMATE CHANGE – UNFCCC, 1998). Em dezembro de 2012, o Protocolo de Quioto foi revisto, através da “Emenda de Doha ao Protocolo de Quioto”, que determinou uma nova taxa de redução de emissões de GEE em pelo menos 18% abaixo dos níveis de 1990 de 2013 a 2020 (UNFCCC, 2012).

Figura 1. Evolução do número de artigos publicados em função das expressões-chave utilizadas no mapeamento



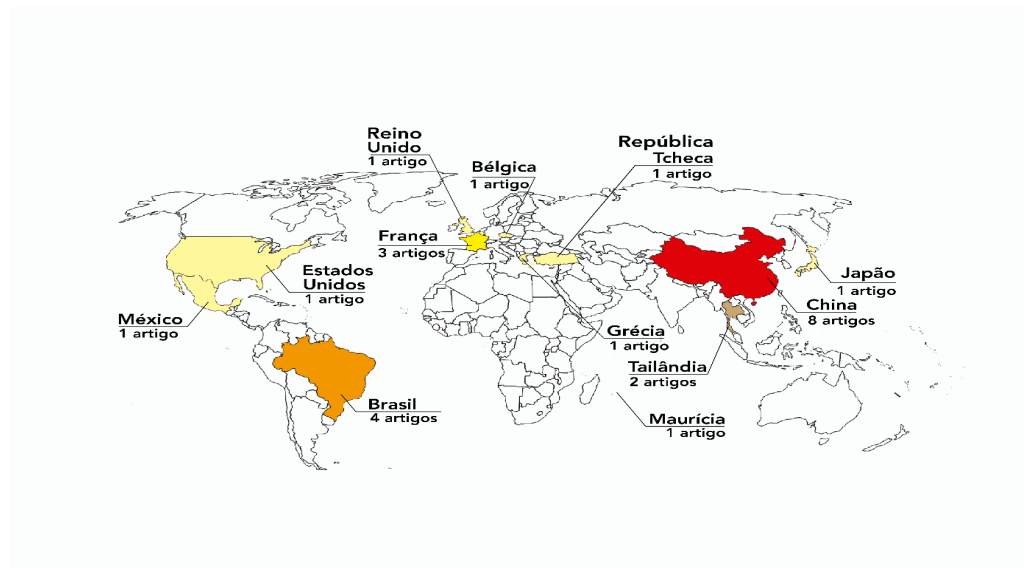
Fonte: Próprio autor.

Através de um dos mecanismos do protocolo, o Mecanismo de Desenvolvimento Limpo (MDL), países desenvolvidos podem compensar sua emissão através da implementação de projetos de redução de GEE em países em desenvolvimento. Esta ferramenta, ao mesmo tempo em que dá aos países industrializados alguma flexibilidade na forma como atingem seus objetivos, estimula o desenvolvimento sustentável em nível global. Nesse contexto, buscando entender a influência destas iniciativas na produção científica dos países, os artigos foram classificados de acordo com o país em que foram realizados (Figura 2).

Avaliando a Figura 2, é possível perceber que Brasil e China, países em desenvolvimento, concentraram a maior parte dos estudos relacionados com o reaproveitamento da lama residual de concreto em produtos cimentícios,

demonstrando assim que a relação com o Protocolo de Quioto pode ser estabelecida.

Figura 2. Principais países com publicações de artigos de periódicos contidos no mapeamento realizado



Fonte: Próprio autor.

3.1 Gestão de resíduos em usinas dosadoras de concreto

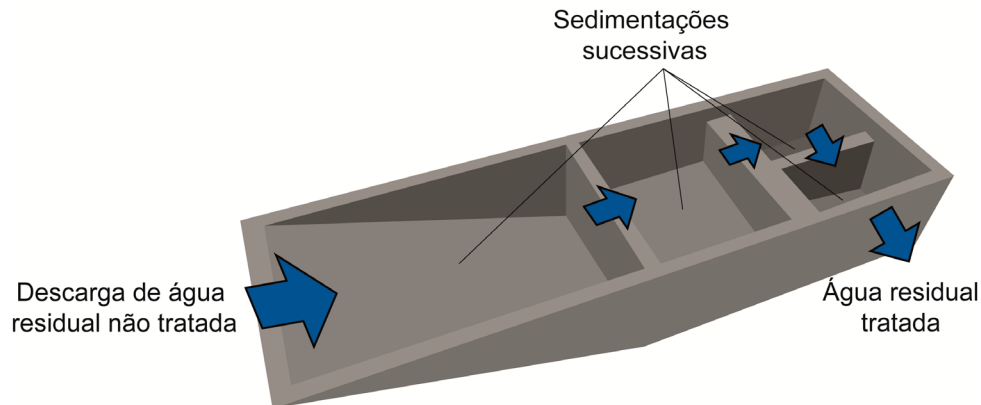
Em uma usina dosadora de concreto pré-fabricado com produção média diária de 1000 m³, estima-se que cerca de 8 a 10 mil kg de resíduos de concreto fresco sejam gerados a cada dia de trabalho (KOU; ZHAN; POON, 2012a). Portanto, significa dizer que esta empresa, sozinha, produzirá cerca de 3x10⁶ kg de resíduos ao ano. Contudo, com a promoção da proteção ambiental e com o objetivo de alcançar o desenvolvimento sustentável na indústria do concreto, a adoção de técnicas inovadoras de reciclagem e reutilização de resíduos de cimento e concreto é de suma importância (XUAN et al., 2016b).

A devolução de concreto e a lavagem de pátios e caminhões betoneira são as principais fontes de resíduos dentro de uma usina dosadora de concreto (SEALEY; PHILLIPS; HILL, 2001). No Brasil, a prática corrente das centrais dosadoras para gestão destes resíduos é: utilizar o concreto devolvido para realizar melhorias de infraestrutura dentro da própria empresa (VIEIRA; FIGUEIREDO, 2013) e encaminhar a água residual de concreto para um sistema de tratamento e controle de partículas finas em suspensão antes de sua descarga no sistema público de esgoto ou, até mesmo, para algum possível reuso (PAULA; ILHA, 2014).

Devido as características da água residuária, tais como, elevado pH e alto teor de sólidos suspensos, é necessário que se tenha um manejo adequado desta, visto que, conforme a Resolução CONAMA nº 430, o lançamento de efluentes em solo não poderá representar riscos de poluição às águas superficiais e subterrâneas. Este

sistema de melhora da qualidade da água é tipicamente composto por dois a cinco tanques de sedimentação sucessivos que irão promover a clarificação da água através do assentamento progressivo das partículas suspensas (PAULA; ILHA, 2014) (Figura 3). O resíduo sedimentado no fundo dos tanques é periodicamente dragado e colocado em baias de secagem para posterior disposição em aterros sanitários (SEALEY; PHILLIPS; HILL, 2001).

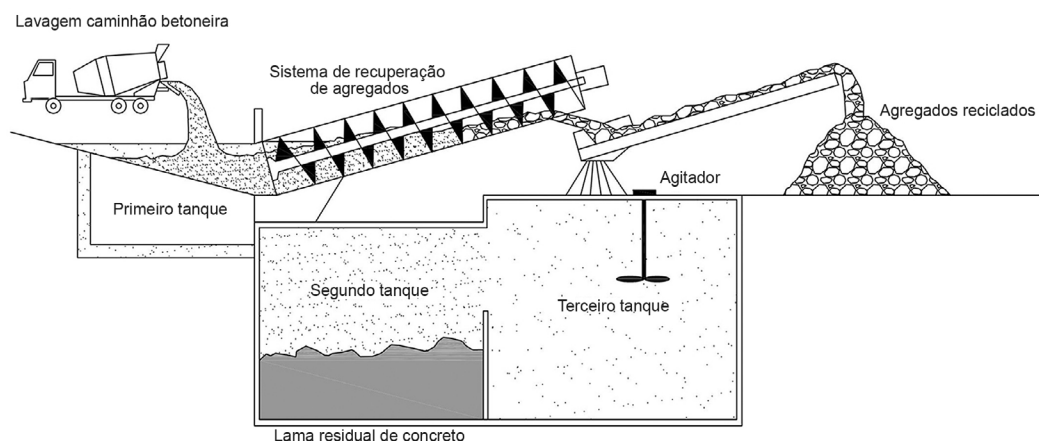
Figura 3. Sistema de gestão de resíduos em uma usina de concreto pré-fabricado



Fonte: Adaptado de Silva e Paula (2019).

Vale ressaltar ainda que este método pode ser combinado com sistemas de recuperação de agregados e de filtragem dos sólidos decantados (XUAN et al., 2016a; WANG, ZHANG; 2018)) (Figura 4).

Figura 4. Sistema de gestão de resíduos em uma usina de concreto pré-fabricado



Fonte: Adaptado de Wang e Zhang (2018).

O material recém dragado ou filtrado é composto, basicamente, por altos teores de água (variando entre 50 a 150% a depender do método de obtenção), agregado residual do concreto original e pasta de cimento, formando assim uma pasta com certa fluidez. Porém, se submetido à um processo de secagem, este resíduo se torna um material aglomerado e, a depender do grau de esmagamento e moagem, forma um produto granular ou em pó (WANG; ZHANG, 2018). Portanto, neste estudo, a

pasta dragada do fundo dos tanques de sedimentação será chamada de lama residual de concreto (LRC) e o material sólido proveniente de sua secagem, de lama residual de concreto seca (LRC-S).

3.2 Caracterização da lama residual de concreto seca (LRC-S)

A composição química da LRC-S depende do tipo de cimento, dos períodos de armazenamento, método de desidratação e processo de fabricação das diferentes usinas de concreto pré-fabricado (WANG; ZHANG, 2018). Assim, a composição química da LRC-S e do cimento Portland (CP I), em termo de óxidos, segundo alguns autores, estão apresentados na Tabela 2.

Tabela 2. Composição química, em %, da LRC-S e do cimento Portland (CP I) segundo alguns autores

Ref.	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	SiO ₂	MgO	LOI
Pistilli e Peterson (1975)	5,2	2,8	38,4	24,5	4,2	23,3
Chatveera, Lertwattanakul e Makul (2006)	5,2	3,2	66,3	26,9	1,2	-
Chatveera; Lertwattanakul, (2009)	7,3	4,0	31,3	25,0	1,6	21,0
Schoon et al. (2014)	2,7 - 5,1	1,5 - 1,7	13,5 - 33,1	36,8 - 69,7	1,2 - 3,2	18,2 - 9,1
Audo et al. (2018)	1,5 - 3,1	1,3 - 2,2	29,8 - 51,0	27,9 - 59,3	0,5 - 0,8	6,8 - 14,6
Xuan et al. (2016a, b)	7,9 - 9,1	6,0 - 6,9	32,4 - 37,4	31,2 - 35,2	1,1 - 1,9	8,0 - 12,1
Intervalo	1,5 - 9,1	1,3 - 6,9	13,5 - 66,3	24,5 - 69,7	0,5 - 4,2	6,8 - 23,3
Cimento Portland (CP I) Xuan et al. (2016a)	3,8	3,1	64,5	19,6	1,5	1,0

Fonte: Próprio autor.

Através dos resultados obtidos, observa-se que, assim como o Cimento Portland, a LRC-S possui altas concentrações de óxido de cálcio (CaO) e dióxido de silício (SiO₂), porém com algumas diferenças. A quantidade de CaO presente na LRC-S (13,5% – 66,3%) é menor que a do CP I (64,5%) porque parte dos hidratos e do hidróxido de cálcio (Ca(OH)₂) permanecem em solução na água residuária e são perdidos com o fluxo de água (WANG; ZHANG, 2018). Já os maiores teores de SiO₂ (24,5% – 69,7%) em relação ao CP I (19,3%) é explicada pela presença de areia remanescente do concreto original (XUAN et al., 2016a). Verifica-se também que a perda ao fogo (LOI) da LRC-S (6,8% - 23,3%) é mais alta do que a do cimento Portland (1,0%). No entanto, a LOI do pó de lama não pode ser diretamente relacionada com o teor de carbono, visto que há uma grande quantidade de água ligada aos produtos de hidratação e que é libertada a temperaturas elevadas (CHATVEERA; LERTWATTANARUK, 2009).

Audo, Mahieux e Turcry (2016) realizaram o teste de difração de raios X (DRX) para duas frações de LRC-S, sendo uma mais fina que 100 μm (fração A) e uma mais grossa que 100 μm (fração B). Os autores concluíram que o material mais grosso é composto principalmente por agregados, quartzo (SiO_2) e calcário (CaCO_3), mas que também apresentaram conglomerados de portlandita ($\text{Ca}(\text{OH})_2$) e silicatos de cálcio hidratados (C-S-H). Já a composição da fração mais fina é mais complexa, apresentando quartzo, calcário e portlandita como constituintes principais, mas com a presença de gesso ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$), bem como compostos anidro ($2\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$; $3\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$) e silicatos de cálcio hidratados (C-S-H).

Audo, Mahieux e Turcry (2016) destacam também que a presença de silicatos de cálcio anidro mostra potencial atividade hidráulica residual. Porém, o tempo de hidratação da LRC é determinante para a ocorrência de compostos anidros na LRC-S. Zhang e Fujiwara (2007) verificaram que enquanto a LRC-S com 1 dia hidratação era formada por quartzo e compostos hidratados e anidros de cimento, após 28 dias de hidratação, embora algum cimento não hidratado pudesse ser encontrado, a LRC-S era formada majoritariamente por hidratos de cimento e quartzo.

Além disso, a partir do estudo de microscopia eletrônica de varredura, Zhang e Fujiwara (2007) verificaram que, comparado com as partículas de cimento angulares com superfície lisa, a estrutura da LRC-S ao longo de sua hidratação se aproxima à morfologia de um favo de mel com superfície rugosa, coberto por um gel descontínuo de C-S-H e etringita.

Chatveera e Lertwattanak (2009), obtiveram resultado semelhante, também destacando a presença de agulhas etringita e aglomerados de C-S-H. Audó, Mahieux e Turcry (2016) e Wang e Zhang (2018) ressaltam que esta morfologia desforme e porosa das partículas da lama residual de concreto faz com que este material possua elevada área específica, podendo alcançar valores de até 31.000 m^2/kg (ZHANG; FUJIWARA, 2007). Assim, é necessária mais água para envolver as partículas do resíduo, gerando alta demanda por água na mistura.

3.3 Aplicações e potencialidades na engenharia

Assim, com o intuito de facilitar o gerenciamento da LRC, diferentes técnicas de reciclagem e reutilização em produtos de cimento foram relatadas por pesquisas anteriores, conforme listado no Quadro 1. Conforme pode ser observado, o comportamento do material produzido com a incorporação da LRC varia em função da metodologia empregada e, assim, os principais impactos serão discutidos nos próximos itens deste artigo.

Quadro 1. Potenciais métodos de gestão para resíduos de lama de concreto em produtos de cimento

ID	Considerações técnicas	Impactos práticos
Correia et al. (2009)	LRC-S como substituto parcial de 10, 20 e 30%, em massa, de agregados miúdos naturais para produção de concreto com relações de água/cimento (a/c) variando de 0,40 até 0,60.	- Baixa trabalhabilidade - Alta absorção de água - Resistência à compressão pouco comprometida
Kou; Zhan; Poon (2012b)	LRC-S em substituição aos agregados graúdos naturais em porcentagens de 0, 15, 30 e 50%, em massa, para a produção de concreto.	- Baixa densidade - Alta absorção de água - Degradação da resistência à compressão e tração
Kou; Zhan; Poon (2012a)	LRC-S para produção de blocos de concreto à uma taxa de substituição, em massa, de 0, 25, 50, 75 e 100% da areia natural.	- Efeitos na trabalhabilidade não são tão sentidos - Baixa densidade - Alta absorção de água - Melhora da resistência à compressão e tração
Serifou et al., (2013)	LRC-S como substituto de agregados graúdos e miúdo. (Série I (50 e 100%, em massa, do agregado miúdo), Série II (50 e 100%, em massa, do agregado graúdo) e Série III (50 e 100%, em massa, dos agregados miúdos e graúdos)).	- Baixa trabalhabilidade - Alta porosidade - Degradação da resistência à compressão
Rughooputh; Rana; Joorawon, (2016)	LRC-S como substituto aos agregados totais (graúdos e miúdos) em concreto não estrutural à uma taxa de substituição de 10, 15, 20 e 30%, em massa.	- Baixa densidade - Alta absorção de água - Degradação da resistência à compressão e tração
Audo; Mahieux; Turcry (2016)	Lama residual no estado seco e pastoso como substituto total de filer de calcário para produção de argamassas (Amostras coletadas em quatro usinas de concreto diferentes (C1, C2, C3 e C4) e avaliadas separadamente).	- Baixa trabalhabilidade - Porosidade equivalente ao traço referência - Variação do comportamento em função da amostra estudada
Xuan et al., (2016a) Xuan et al. (2016b)	Utilização da carbonatação acelerada como método de cura de blocos de concreto produzidas com a lama residual ainda pastosa como aglutinante (Apenas o método de cura foi variado).	- Método diminui a porosidade e aumenta a densidade - Melhora do comportamento à compressão - Sequestro de CO₂

Fonte: Próprio autor.

3.3.1 Consistência

A consistência de uma argamassa ou concreto fresco é uma propriedade física relacionada com o estado de fluidez da mistura, sendo a facilidade maior ou menor de se deformar sob cargas. A consistência adequada é fundamental para garantir a trabalhabilidade do material, ou seja, a facilidade com que as massas podem ser trabalhadas sem que haja segregação (AMBROZEWICZ, 2012). O principal fator que influi na consistência e, conseqüentemente, na trabalhabilidade, é o teor de água disponível na mistura (BAUER, 2015). A trabalhabilidade de concretos e argamassas que incorporam a LRC-S é seriamente afetada com o aumento do teor de resíduos.

Quando comparado com outros materiais usualmente utilizados em misturas de concreto, a LRC-S possui características marcantes, como: baixa densidade (entre 1,33 g/cm³ (KOU; ZHAN; POON, 2012a) e 2,6 g/cm³ (SÉRIFOU et al., 2013)) e alta absorção de água (entre 38% (KOU; ZHAN; POON, 2012b) e 4,3% (SÉRIFOU et al., 2013)). Desta forma, para se alcançar capacidade de trabalho requerida é necessário ajustar o volume de água de amassamento ou adicionar aditivos plastificantes. No entanto, estas medidas devem ser realizadas com cautela. Sérifou et al. (2013) verificaram que o volume de água adicionado às misturas de concreto produzidas com agregados miúdos de LRC-S chegou a ser 44% maior do que as misturas de referência, resultando em concretos porosos e pouco resistentes. Já Audo, Mahieux e Turcry (2016) constataram que, ao se utilizar a LRC-S em argamassas, era necessária uma porcentagem de superplastificante muito elevada e que dificilmente será compatível com uma aplicação industrial (de 0,5% a 1% da massa de cimento). Por outro lado, Kou, Zhan e Poon (2012b) destacam que os efeitos da LRC-S na trabalhabilidade do concreto utilizado para produção de blocos são menos sentidos. Como estes produtos utilizam apenas uma quantidade mínima de água de amassamento, as dificuldades de se controlar a razão água/cimento (a/c) e a capacidade de trabalhar do material são reduzidas (POON; KOU; LAM, 2002) e, assim, as conseqüências da alta absorção de água da LRC-S são atenuadas. Portanto, é possível verificar que a trabalhabilidade é um aspecto importante e que pode interferir tanto a viabilidade técnica, quanto econômica, do produto proposto.

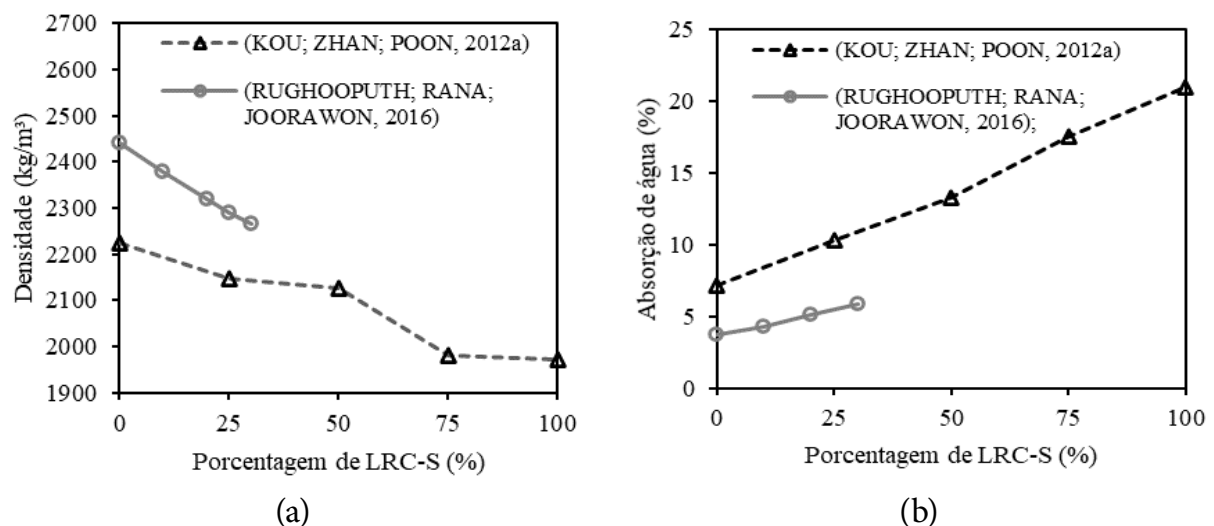
3.3.2 Densidade e absorção de água

A densidade e a absorção de água de concretos e argamassas são propriedades físicas que influenciam diretamente a sua resistência à compressão e durabilidade (KOU; ZHAN; POON, 2012a; RUGHOPUTH; RANA; JOORAWON, 2016) e estão intimamente relacionadas com os tipos de materiais empregados, grau de adensamento e quantidade de vazios (AMBROZEWICZ, 2012). Estudos realizados demonstram que a utilização da LRC-S como agregados ocasiona a diminuição da densidade e aumento da absorção de água de concretos (CORREIA et al., 2009; KOU; ZHAN; POON, 2012a;

RUGHOOPUTH; RANA; JOORAWON, 2016) e blocos (KOU; ZHAN; POON, 2012b). Por outro lado, tal tendência não foi observada quando a LRC-S foi utilizada como filler em argamassas, visto que os traços com adição de resíduos apresentaram porosidade equivalente à referência (AUDO; MAHIEUX; TURCRY, 2016).

A densidade do concreto e dos blocos diminuíram linearmente com o aumento do teor agregado de LRC-S (Figura 5a). Enquanto isso, a capacidade de absorção de água das misturas cresceu à medida que mais agregados de LRC-S foram adicionados (Figura 5b). A menor densidade e a maior absorção de água da LRC-S aumenta a relação água/cimento (a/c) para alcançar a mesma trabalhabilidade, contribuindo assim para a diminuição da densidade e o aumento da porosidade total e da absorção de água (CORREIA et al., 2009; KOU; ZHAN; POON, 2012a; KOU; ZHAN; POON, 2012b; RUGHOOPUTH; RANA; JOORAWON, 2016).

Figura 5. Variação da densidade (a) e absorção de água (b) em função da variação do teor de LRC-S



Fonte: Próprio autor.

3.3.3 Resistência à compressão simples

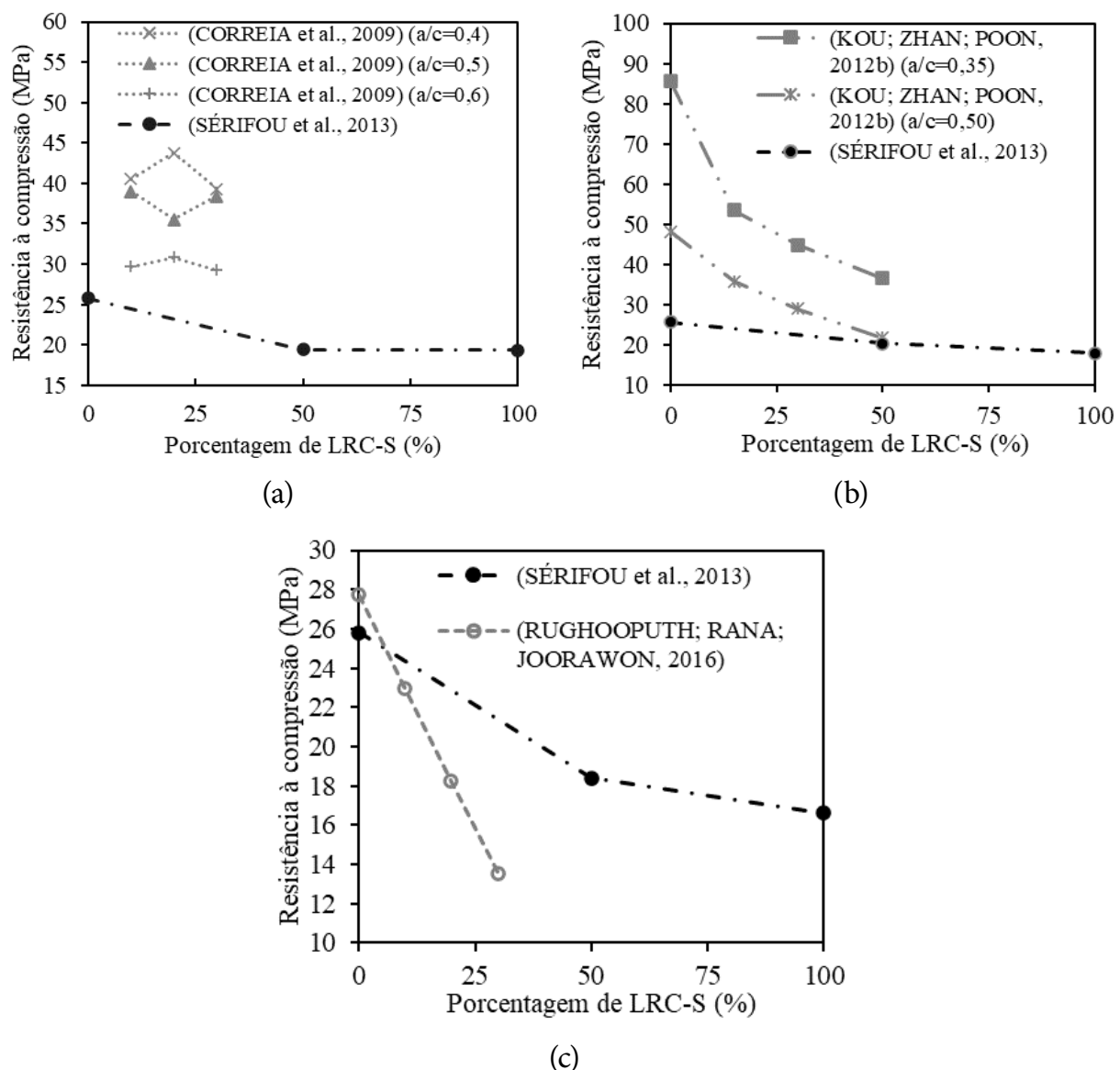
Avaliando a literatura disponível, foi possível perceber que o comportamento à compressão de concretos, argamassas e blocos de concreto apresentaram algumas diferenças entre si e assim serão avaliadas individualmente.

Em função do objeto de estudo de cada artigo, a utilização da lama residual de concreto se deu de três formas: substituição total ou parcial de agregados miúdos (Figura 6a), substituição total ou parcial dos agregados graúdos (Figura 6b) ou substituição total ou parcial dos agregados totais (miúdos e graúdos) (Figura 6c). Avaliando o comportamento geral dos estudos realizados, constata-se que a resistência à compressão de misturas de concreto preparadas com a LRC-S foi significativamente comprometida, independentemente da substituição realizada. A presença de poros e

pontos frágeis na zona de transição entre a pasta de cimento antiga (pouco resistente) e a nova (mais resistente) favorecem a ruptura do concreto quando submetidos a tensões (SÉRIFOU et al., 2013).

Portanto, esta queda no desempenho à compressão pode ser atribuída às características físicas e mecânicas da LRC-S que, quando comparada com o agregado natural, apresenta menor resistência, menor densidade e maior capacidade de absorção de água (KOU; ZHAN; POON, 2012a; RUGHOOPTH; RANA; JOORAWON, 2016; SÉRIFOU et al., 2013). Além disso, é possível verificar a influência de altas relações de a/c no comportamento mecânico dos concretos produzidos, visto que, para um mesmo teor de resíduos incorporados, as maiores relações de a/c apresentaram um comportamento sempre inferior (CORREIA et al., 2009; KOU; ZHAN; POON, 2012a).

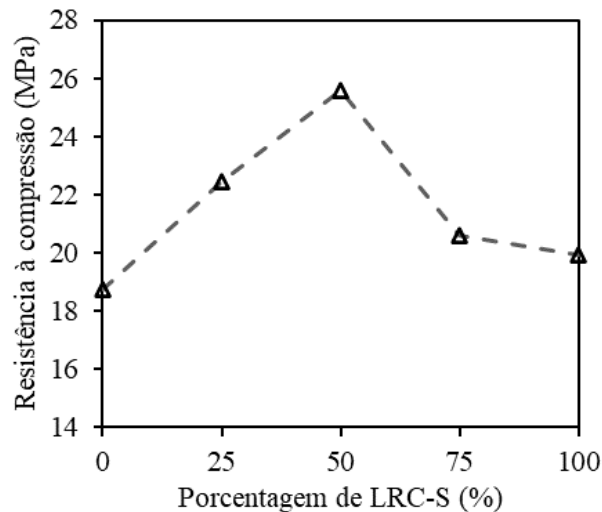
Figura 6. Variação da resistência à compressão aos 28 dias de concretos utilizando a LRC-S em substituição aos agregados miúdos (a), agregados graúdos (b) e agregados miúdos e graúdos (c)



Fonte: Próprio autor.

Como pode ser observada, apesar dos benefícios ambientais gerados pela incorporação de resíduos em concreto, a viabilidade técnica ainda é bastante limitada. Nesse contexto, Kou, Zhan e Poon (2012b) propuseram pela primeira vez a utilização da lama residual de concreto para produção de blocos. Para tanto, os autores estabeleceram uma taxa de substituição, em massa, de 0, 25, 50, 75 e 100% da areia natural pela LRC-S e os resultados mostraram que, para qualquer intervalo de substituição, houve um acréscimo de resistência à compressão em relação ao traço referência (Figura 7a). Além disso, a substituição de 50% dos agregados miúdos por LRC-S apresentou o melhor desempenho entre os traços propostos. Os autores atribuíram esse comportamento à presença de cimento não hidratado e ao efeito filer desempenhado pelo resíduo estudado.

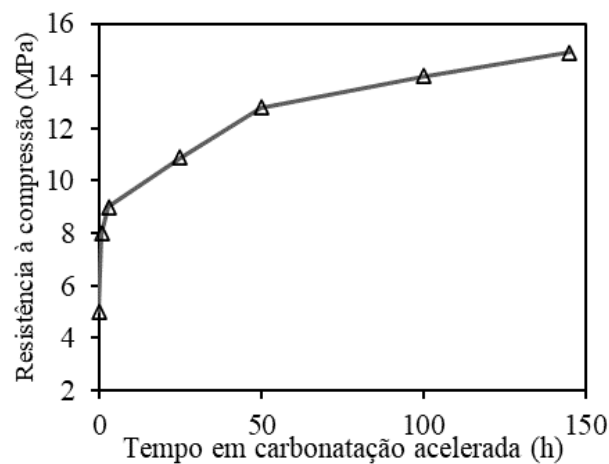
Figura 7. Variação da resistência à compressão aos 28 dias em função da substituição dos agregados totais por LRC-S em blocos de concreto



Fonte: Adaptado de Kou, Zhan e Poon (2012a).

Em estudos recentes, Xuan et al. (2016a) e Xuan et al. (2016b) também propuseram a utilização da LRC em blocos de concreto, porém no estado pastoso. Os autores verificaram que a utilização da carbonatação acelerada como método de cura dos blocos produzidos com a lama residual de concreto ainda pastosa (LRC-P) pode influenciar positivamente a sua resistência à compressão. Os blocos submetidos à esta metodologia por um período de 3 e 50 h apresentaram, respectivamente, 81 e 100% da resistência à compressão das amostras curadas ao ar por 28 dias. Além disso, os autores verificaram que, mesmo após as 50 h, a resistência à compressão continua a se desenvolver, superando assim os blocos de concreto curados ao ar (Figura 8). Os autores justificaram este comportamento pela presença de sólidos produzidos durante as reações entre o gás carbônico e os produtos de hidratação do concreto, que ocupam os poros do bloco, resultando em uma redução geral da porosidade e aumento da densidade de toda a microestrutura do bloco.

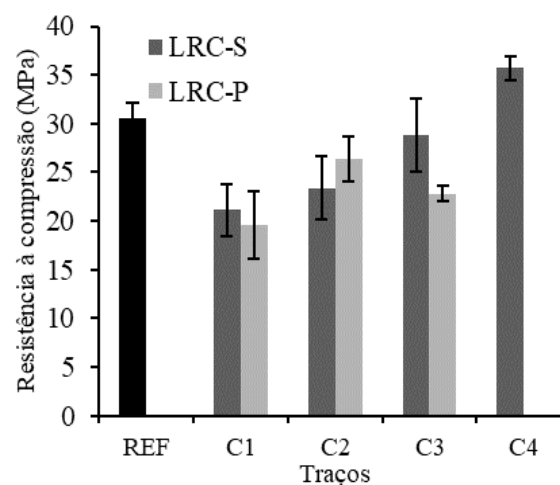
Figura 8. Variação da resistência à compressão de blocos de concreto com LRC-P e submetidas à cura por carbonatação acelerada



Fonte: Adaptado de Xuan et al. (2016b).

Por fim, Audo, Mahieux e Turcry (2016) estudaram incorporar a LRC em argamassas de cimento como substituto total de filer calcário. Para tanto, os autores utilizaram a lama de concreto no estado seco (LRC-S) e pastoso (LRC-P), e coletadas em quatro usinas de concreto diferentes (C1, C2, C3 e C4). Através dos resultados obtidos (Figura 9), verifica-se que resíduos de diferentes usinas de concreto apresentaram comportamentos distintos. Com relação à LRC-S, aos 28 dias de idade, as amostras C1, C2 e C3 apresentaram menor resistência à compressão em comparação com a referência (31, 24 e 6%, respectivamente). Por outro lado, a argamassa produzida com a amostra C4 apresentou um aumento da resistência à compressão de 17%. Os autores atribuíram tal resultado à maior quantidade de finos contida na amostra C4. Da mesma forma, quando utilizada a LRC-P, as amostras C1, C2 e C3 apresentaram redução de 36, 14 e 25%, respectivamente. Vale ressaltar que a amostra C4 não foi utilizada em estado pastoso.

Figura 9. Resistência à compressão aos 28 dias de argamassa produzida com lama residual de concreto seca (LRC-S) e pastosa (LRC-P)

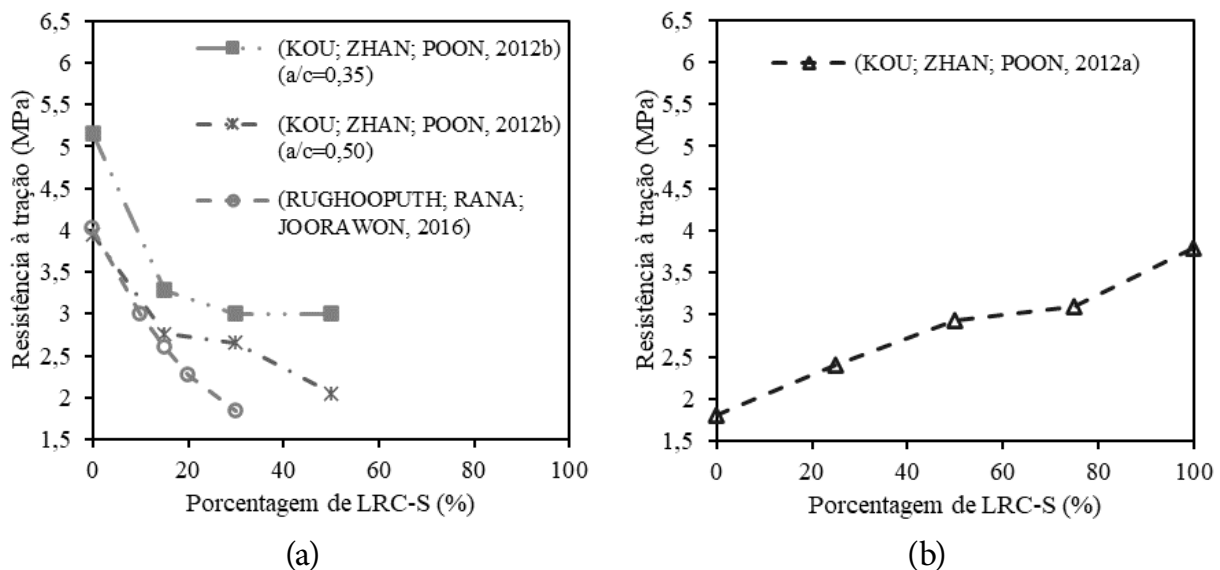


Fonte: Adaptado de Audo, Mahieux e Turcry (2016).

3.3.4 Resistência à tração

É possível verificar que a influência da LRC-S no comportamento à tração de concretos (Figura 10a) e blocos (Figura 10b) se relacionam, seguindo a mesma tendência apresentada quando submetidas a esforços de compressão. Portanto, enquanto os blocos são beneficiados com a incorporação de agregados reciclados de LRC-S, os concretos apresentam perda gradativa de seu desempenho à tração. Vale destacar que a influência da incorporação da LRC em argamassas ainda não foi determinada e, portanto, é inviável fazer alguma inferência ao seu respeito.

Figura 10. Variação da resistência à tração aos 28 dias em função da incorporação da LRC-S em concreto (a) e blocos (b)



Fonte: Próprio autor.

4 Considerações finais

Através do mapeamento sistemático foi possível perceber que o emprego de resíduos na indústria da construção está em expansão e representa um avanço importante na tecnologia sustentável. A reintegração destes materiais no processo produtivo de um bem durável poderá não só reduzir o volume de resíduos sólidos gerados, mas também a demanda por agregados naturais e cimento Portland, modificando diretamente a quantidade de recursos naturais e energéticos consumidos.

Por outro lado, percebe-se também que os produtos cimentícios, tais como concretos e argamassas, são materiais muito influenciados pelas características físicas e químicas dos elementos constituintes. A menor densidade e maior porosidade da LRC-S gerou impactos significativos, contribuindo para a redução da resistência mecânica e aumento da porosidade total e absorção de água dos materiais produzidos. Por outro lado, quando avaliada a utilização em blocos de concreto, verifica-se

uma aplicação particularmente interessante. Devido ao seu processo produtivo não necessitar de grande trabalhabilidade do concreto que constitui o bloco, a redução da água livre da mistura é menos sentida, possibilitando assim maiores teores de incorporação sem um sério comprometimento das propriedades mecânicas. Além disso, os blocos de concreto permitem a utilização de técnicas de cura especiais para peças pré-moldadas, tal qual a carbonatação acelerada, melhorando assim as suas propriedades finais.

No entanto, vale ressaltar que as pesquisas já realizadas ainda não são suficientes para analisar e discutir todos os impactos relacionados à utilização da lama residual de concreto, havendo uma lacuna para o desenvolvimento de novos estudos que viabilizem o reaproveitamento deste material. Finalmente, é possível destacar que a aplicação do mapeamento sistemático para a elaboração da revisão de literatura forneceu uma visão ampla do campo de pesquisa e permitiu estar em contato com as principais pesquisas relacionadas com o tema.

Referências

- AMBROZEWICZ, P. H. L. *Materiais de construção*. 1.ed. - São Paulo: PINI, 2012. 457 p.
- AUDO, M.; MAHIEUX, P.; TURCRY, P. Utilization of sludge from ready-mixed concrete plants as a substitute for limestone fillers. *Construction And Building Materials*, v. 112, p. 790-799, jun. 2016.
- AUDO, M. et al. Characterization of ready-mixed concrete plants sludge and incorporation into mortars: Origin of pollutants, environmental characterization and impacts on mortars characteristics. *Journal Of Cleaner Production*, v. 183, p. 153-161, maio 2018.
- BAUER, L. A. F. *Materiais de construção*, 1. 5.ed. Revisada. - Rio de Janeiro: LTC, 2015. 471 p.
- CONAMA (2011). Resolução nº 430, 13 de maio de 2011. Dispõe sobre as condições e padrões de lançamento de efluentes, complementa e altera a Resolução nº 357, de 17 de março de 2005, do Conselho Nacional do Meio Ambiente-CONAMA.
- CORREIA, S.L.; SOUZA, F.L.; DIENSTMANN, G.; SEGADÃES, A. M. Assessment of the recycling potential of fresh concrete waste using a factorial design of experiments. *Waste Management*, v. 29, n. 11, p. 2886-2891, nov. 2009.
- CHATVEERA, B.; LERTWATTANARUK, P.; MAKUL, N.. Effect of sludge water from ready-mixed concrete plant on properties and durability of concrete. *Cement And Concrete Composites*, v. 28, n. 5, p. 441-450, maio 2006.
- CHATVEERA, B.; LERTWATTANARUK, P. Use of ready-mixed concrete plant sludge water in concrete containing an additive or admixture. *Journal Of Environmental Management*, v. 90, n. 5, p. 1901-1908, abr. 2009.
- KISKU, N.; JOSHI, H.; ANSARI, M.; PANDA, S. K.; NAYAK, S.; DUTTA, S. C. A critical review and assessment for usage of recycled aggregate as sustainable construction material. *Construction And Building Materials*, v. 131, p.721-740, jan. 2017.
- KOU, S.; ZHAN, B.; POON, C. Feasibility study of using recycled fresh concrete waste as coarse aggregates in concrete. *Construction And Building Materials*, v. 28, n. 1, p. 549-556, mar. 2012b.
- KOU, S.; ZHAN, B.; POON, C. Properties of partition wall blocks prepared with fresh concrete wastes. *Construction And Building Materials*, v. 36, p.566-571, nov. 2012a.
- PAULA, H. M. de; ILHA, M. S. O. Qualidade da água residuária de usina de concreto para fins de aproveitamento. *Revista Ibracon de Estruturas e Materiais*, v. 7, n. 3, p. 349-366, jun. 2014.
- PAULA, H. M. de; ILHA, M. S. O. USO DA MORINGA OLEIFERA NO TRATAMENTO DE ÁGUAS REDISUÁRIAS DE USINAS DE CONCRETO: MAPEAMENTO SISTEMÁTICO. *Reec - Revista Eletrônica de Engenharia Civil*, v. 11, n. 1, p. 50-60, 1 fev. 2016.
- PISTILLI, M. F., PETERSON, C. F., SHAH, S. P. Properties and possible recycling of solid waste from ready-mix concrete. *Cement and Concrete Research*, v. 5, n. 3, p. 249-260, 12 mar. 1975.

- RUGHOOPTH, R.; RANA, J. O.; JOORAWON, K. Possibility of using fresh concrete waste in concrete for non structural civil engineering works as a waste management strategy. *Ksce Journal Of Civil Engineering*, v. 21, n. 1, p. 94-99, 28 mar. 2016.
- SEALEY, B.J., PHILLIPS, P.S., HILL, G.J., "Waste management issues for the UK ready-mixed concrete industry". *Resources, Conservation And Recycling*, v. 32, n. 3-4, p. 321-331, Jul. 2001.
- SÉRIFOU, M.; SBARTAÏ, Z. M.; YOTTE, S.; BOFFOUÉ, M. O.; EMERUWA, E.; BOS, F. A Study of Concrete Made with Fine and Coarse Aggregates Recycled from Fresh Concrete Waste. *Journal Of Construction Engineering*, v. 2013, p.1-5, 2013.
- SCHOON, Joris et al. Feasibility Study of the Use of Concrete Sludge As Alternative Raw Material for Portland Clinker Production. *Journal Of Materials In Civil Engineering*, v. 27, n. 10, p.1-12, out. 2015.
- SILVA, D. O. F. Reaproveitamento de lamas residuais do processo de fabricação do concreto. Tese (Mestrado em Ciências) – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2016
- SILVA, T. A. C.; PAULA, H. M. Gestão da água em usina de concreto: análise do emprego de moringa oleífera no tratamento de água residuária e proposta de reuso após tratamento. *Matéria (Rio de Janeiro)*, v. 24, n. 2, p. 1-13, 2019.
- UNITED NATIONS FRAMEWORK CONVENTION ON CLIMATE CHANGE (UNFCCC). *Doha amendment to the Kyoto Protocol*. Disponível em: http://unfccc.int/files/kyoto_protocol/application/pdf/kp_doha_amendment_english.pdf. Acesso em: 22 jan 2018.
- UNITED NATIONS FRAMEWORK CONVENTION ON CLIMATE CHANGE (UNFCCC). *Kyoto protocol to the united nations framework convention on climate change*. Disponível em: <http://unfccc.int/resource/docs/convkp/kpeng.pdf>. Acesso em: 22 jan 2018.
- VIEIRA, L. B. P., FIGUEIREDO, A. D., Resíduos da Concreteira: o aproveitamento do problema, *Revista Concreto IBRACON*, v. 22, p. 49-53, Set. 2013
- VIEIRA, L. B. P.; FIGUEIREDO, A. D. de. Evaluation of concrete recycling system efficiency for ready-mix concrete plants. *Waste Management*, v. 56, p. 337-351, out. 2016.
- XUAN, D.; ZHAN, B.; POON, C.; ZHENG, W. Carbon dioxide sequestration of concrete slurry waste and its valorisation in construction products. *Construction And Building Materials*, v. 113, p. 664-672, jun. 2016a.
- XUAN, D.; ZHAN, B.; POON, C.; ZHENG, W. Innovative reuse of concrete slurry waste from ready-mixed concrete plants in construction products. *Journal Of Hazardous Materials*, v. 312, p.65-72, jul. 2016b.
- WANG, R.; ZHANG, Y. X. Recycling fresh concrete waste: A review. *Structural Concrete*, p. 1-17, 15 maio 2018.
- ZHANG, Jinxi; FUJIWARA, Tadashi. Concrete Sludge Powder for Soil Stabilization. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, v. 2026, n. 1, p. 54-59, jan. 2007.