

USO DE LAMA RESIDUAL DE CONCRETO COMO SUBSTITUTO DA CAL HIDRATADA PARA PRODUÇÃO DE ARGAMASSAS DE REVESTIMENTO

Use of concrete sludge waste as substitute of hydrated lime for production of rendering mortars

Igor Mazon Carvalho¹, Walter Batista Bonfim², Heber Martins de Paula³

Recebido em 28 de março de 2019; aceito em 28 de julho de 2019; disponível on-line em 20 de setembro de 2019.



PALAVRAS CHAVE:

Lama residual de concreto;
Usina dosadora de concreto;
Argamassa;
Cal hidratada;
Resíduo cimentício;

KEYWORDS:

Concrete sludge waste;
Concrete batching plants;
Mortar;
Hydrated lime;
Cementitious waste.

RESUMO: A construção civil tem sido reconhecida como uma atividade responsável por grande degradação ambiental. Assim, a maior sustentabilidade nesse setor da economia pode ser melhorada através da adoção de “tecnologias limpas”, de forma a minimizar os impactos ambientais em termos de geração de resíduos e consumo de energia e materiais tradicionais. Ainda pouco estudada, a utilização da lama residual de concreto (LRC) como material alternativo para produção de argamassas pode ser uma alternativa viável. Assim sendo, o presente artigo tem como objetivo avaliar o desempenho mecânico de argamassas produzidas com a lama residual de concreto seca (LRC-S) como substituto total e parcial da cal hidratada, avaliando o seu comportamento por meio de ensaios de consistência, resistência à tração na flexão e à compressão, absorção de água por capilaridade e densidade. No estado fresco, foi constatado que a utilização da LRC-S possui um impacto negativo na trabalhabilidade das argamassas, sobretudo para taxas de substituição superiores a 75%, em massa. Por outro lado, a substituição da cal hidratada, em até 50% em massa, se mostra viável, apresentando propriedades mecânicas equivalentes ao traço tomado como referência.

ABSTRACT: Civil construction has been recognized as an activity responsible for major environmental degradation. Therefore, greater sustainability in this sector of the economy can be improved by adopting “clean technologies” to minimize environmental impacts in terms of waste generation and energy and material consumption. Still little studied, the use of concrete sludge waste (CSW) as an alternative material for the production of mortars can be a viable alternative. The purpose of this study is to evaluate the mechanical performance of mortars produced with dry sludge as a total and partial substitute for hydrated lime, evaluating its behavior through tests of consistency, flexural strength and compression, water absorption by capillarity and density. In the fresh state, it was found that the use of CSW has a negative impact on the workability of mortars, especially for replacement rates above 75% by mass. On the other hand, the substitution of hydrated lime, up to 50% by mass, is feasible, presenting mechanical properties equivalent to the mix taken as reference.

* Contato com os autores:

¹ e-mail: igor_m_carvalho@hotmail.com (I. M. Carvalho)

Engenheiro civil, graduado pela Universidade Federal de Goiás – UFG;

² e-mail: walter-bonfim@hotmail.com (W. B. Bonfim)

Engenheiro Civil, Mestrando, Programa de Pós-Graduação em Modelagem e Otimização, Unidade Acadêmica Especial de Matemática e Tecnologia, Universidade Federal de Goiás;

³ e-mail: heberdepaula@hotmail.com (H. M. de Paula)

Engenheiro Civil, Doutor, Professor do Programa de Pós-Graduação em Modelagem e Otimização, Unidade Acadêmica Especial de Matemática e Tecnologia, Universidade Federal de Goiás.

1. INTRODUÇÃO

A construção civil tem sido reconhecida como uma atividade responsável por grande degradação ambiental, gerando impactos em termos de consumo de recursos naturais e energia, além da geração de resíduos. Assim sendo, como o concreto é o material mais utilizado na indústria da construção, a busca por um maior grau de sustentabilidade neste setor da economia pode ser melhorada minimizando os impactos ambientais inerentes a produção do concreto (KISKU et al., 2016).

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 dosadora de concreto. 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 controle de partículas finas em suspensão. Este sistema é formado por tanques sucessivos que promovem a sedimentação dos sólidos suspensos, formando a chamada lama residual de concreto (LRC). Periodicamente, este resíduo sólido é retirado dos tanques e destinado a baias de secagem, para posterior disposição em aterros sanitários (SEALEY; PHILLIPS; HILL, 2001).

A reincorporação da LRC para a produção de produtos de origem cimentícia é de particular interesse, visto que este material é um subproduto de um concreto original e, portanto, apresenta semelhanças químicas e físicas com outros materiais, tais como agregados minerais e cimento Portland, usualmente utilizados para produção de materiais cimentícios (BONFIM et al., 2017). Assim, alguns estudos foram desenvolvidos com o intuito de aproveitar este potencial, sendo a utilização da lama residual de concreto no estado seco (LRC-S) como agregado graúdo ou miúdo no concreto propriamente dito a utilização mais comum (CORREIA et al., 2009; KOU; ZHAN; POON, 2012a;

RUGHOOPUTH; RANA; JOORAWON, 2016; SÉRIFOU et al., 2013).

No entanto, a resistência à compressão de misturas de concreto preparadas com a LRC-S é significativamente comprometida, independentemente da substituição realizada. A presença de poros e pontos de fraqueza na zona de transição entre a pasta de cimento antiga (pouco resistente) e a nova (mais resistente) favorecem a ruptura do concreto ao serem carregados (SÉRIFOU et al., 2013). Portanto, esta queda de rendimento à compressão pode ser atribuída às características físicas e mecânicas da LRC-S que, quando comparado com o agregado natural, apresenta menor resistência, menor densidade e maior capacidade de absorção de água (KOU; ZHAN; POON, 2012a; RUGHOOPUTH; RANA; JOORAWON, 2016; SÉRIFOU et al., 2013).

Por outro lado, Kou, Zhan e Poon (2012b) destacam que os efeitos da LRC-S para produção de alvenarias 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 consequências da alta absorção de água da LRC-S são atenuadas. Nesse contexto, Kou, Zhan e Poon (2012b) propuseram a substituição de até 100% da areia natural por LRC-S e verificaram que, para qualquer taxa de substituição, as alvenarias produzidas apresentavam ganhos de resistência. Os referidos autores atribuíram este comportamento ao efeito filler e à presença de cimento não hidratado no resíduo estudado. Já Xuan et al. (2016a) e Xuan et al. (2016b) também propuseram a utilização da LRC em alvenarias, porém no estado pastoso. Os autores verificaram que a utilização da carbonatação acelerada como método de cura de alvenarias de concreto produzidas com a lama residual de concreto ainda pastosa pode influenciar positivamente a sua resistência à compressão. 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 da alvenaria, resultando em uma redução geral da porosidade e aumento da densidade de toda a microestrutura da alvenaria.

Por fim, Audo, Mahieux e Turcry (2016) estudaram incorporar a LRC em argamassas de cimento como substituto total de filer calcário. Para tanto, utilizaram a lama de concreto no estado seco e pastoso, coletadas em quatro usinas de concreto diferentes. Os autores constataram que ao se utilizar a LRC seca (LRC-S) em argamassas, era necessária uma porcentagem de superplastificante muito elevada e que dificilmente seria compatível com uma aplicação industrial (de 0,5% a 1% da massa de cimento). Além disso, verificaram também que as amostras de LRC-S com maior quantidade de finos apresentaram desempenho superior quando submetidas à compressão. No entanto, os autores enfatizaram a necessidade de novos estudos que comprovem os resultados encontrados por eles.

Através dos dados expostos, nota-se que a gestão ambiental dos resíduos gerados durante a produção de concreto pré-fabricado em usinas dosadoras tem sido valorizada nos últimos anos. Neste contexto, como a lama residual de concreto é um dos principais resíduos desse processo produtivo, ainda há uma lacuna no desenvolvimento de novos estudos que viabilizem a reciclagem desse material (BONFIM et al., 2017). Além disso, deve-se enfatizar que o Brasil é um país em desenvolvimento, com enormes necessidades de infraestrutura que exigirão aplicações de materiais baseados em cimento. Portanto, é digno de procurar novas adições que possam responder às necessidades de desenvolvimento sem degradar o meio ambiente (TOLEDO FILHO et al., 2007).

Assim, o presente artigo tem como objetivo avaliar a viabilidade técnica do uso da lama residual de concreto seca (LRC-S), em substituição à cal hidratada, como material alternativo para produção de argamassas de revestimento.

2. MATERIAL E MÉTODOS

2.1 MATERIAIS TRADICIONAIS

A argamassa de referência produzida neste estudo foi do tipo mista, composta por cimento Portland, cal hidratada, agregado miúdo natural e água tratada. O cimento utilizado foi do tipo II (CP II Z-32), classificado segundo a NBR 16697 (ABNT, 2018) como cimento composto com adição de material pozzolânico. Já a cal hidratada, foi do tipo dolomítica, classificada como CH – III, conforme NBR 7175 (ABNT, 2003). Por fim, o agregado miúdo utilizado foi a areia natural já seca, com denominação comercial “fina” e especificações em acordo com a NBR 7211 (ABNT, 2009). Todos os materiais foram escolhidos pelo fato de serem de fácil acesso na região e tradicionalmente utilizados.

2.2 LAMA RESIDUAL DE CONCRETO SECA (LRC-S)

A lama residual de concreto (LRC) foi obtida diretamente de uma central dosadora localizada no interior do estado de Goiás (Brasil). Esta usina realiza o controle dos sólidos suspensos da água utilizada para lavagem do pátio de produção e dos caminhões betoneira, utilizando um sistema composto por sucessivos tanques de sedimentação (Figura 1). Nesse contexto, a coleta foi realizada através da dragagem do material sedimentado no fundo do primeiro tanque, dando preferência ao resíduo presente na zona “c”. Enquanto esta zona é composta basicamente por finos provenientes da pasta de cimento e de pequena quantidade de agregados miúdos, as demais zonas (“a” e “b”) possuem grande quantidade de agregados graúdos e miúdos, e que não eram interessantes para este estudo.

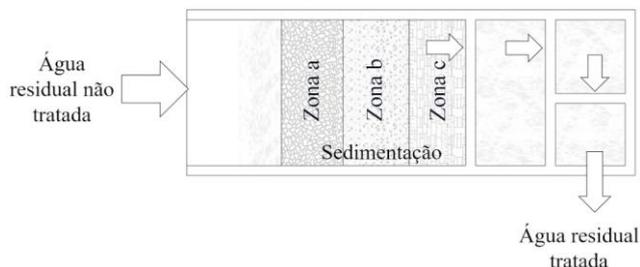


FIGURA 1: Esquema das zonas presentes no tanque de sedimentação para tratamento da água residual de concreto.
FONTE: Autoria Própria.

Feita a coleta da amostra residual a ser utilizada, foi dado início à etapa de processamento da LRC. Após passar por uma secagem prévia ao ar, o resíduo foi colocado em uma estufa com temperatura de ± 105 °C até que houvesse constância de massa, passando então a ser chamada de lama residual de concreto seca (LRC-S). Em seguida, o resíduo foi moído e peneirado de forma manual com o auxílio de um almofariz e uma peneira de abertura de 0,6 mm, com o cuidado de retirar possíveis impurezas do material.

2.3 ENSAIO DE CARACTERIZAÇÃO QUÍMICA

A caracterização química dos materiais se deu através da análise da composição elementar do cimento, da cal hidratada, da LRC-S e da areia, com o auxílio do espectrômetro de fluorescência de raios-X por energia dispersiva (Schimadzu EDX 7000/8000). Antes do ensaio, as amostras foram secas em estufa por um período contínuo de 24 h e homogêneas. Além disso, para o caso do cimento, cal hidratada e LRC-S, as amostras foram compactadas em pequenas pastilhas com o intuito de minimizar possíveis alterações do resultado.

2.4 ENSAIO DE CARACTERIZAÇÃO FÍSICA

Os parâmetros físicos determinados neste estudo foram: densidade de partículas, distribuição granulométrica e módulo de finura. O ensaio de densidade de partículas foi realizado para o cimento, cal hidratada, LRC-S e areia

conforme metodologia proposta pela Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária – EMBRAPA (2011). Já as curvas granulométricas e o módulo de finura da cal hidratada, LRC-S e areia foram determinados conforme prescrito pela NBR NM 248 (ABNT, 2003), utilizando as peneiras com as malhas descritas na Tabela 1.

2.5 PROPORCIONAMENTO E PRODUÇÃO DA ARGAMASSA

A influência da incorporação da LRC-S no desempenho da argamassa foi estudada através da comparação entre o comportamento de um traço tomado como referência, sem resíduos, e de outros quatro traços com substituição de 25, 50, 75 e 100%, em massa, da cal hidratada pela LRC-S. Assim sendo, foi utilizado para o traço de referência uma proporção de mistura tipicamente empregado por uma construtora da região para execução de reboco externo (Tabela 2). Vale ressaltar ainda que, visando evitar os efeitos de altas relações a/c encontradas por outros estudos (RUGHOPUTH; RANA; JOORAWON, 2016; SÉRIFOU et al., 2013), a quantidade de água se manteve fixa para todos os traços. Para tanto, a relação a/c=1,60 foi determinada por meio de estudos preliminares realizados com a mistura referência, fixando uma consistência para este traço de 270 mm \pm 5 mm, conforme método proposto pela NBR 13276 (ABNT, 2016).

TABELA 1: Série de peneiras utilizadas no ensaio de granulometria.

	Malhas							
Mesh	8	14	28	35	60	100	200	270
mm	2,36	1,18	0,6	0,425	0,25	0,15	0,075	0,053

FONTE: Autoria Própria.

TABELA 2: Proporção em massa dos materiais utilizados para produção da argamassa.

Traço	CP	CH	LRC-S	Areia seca	Água
T-00%	1,0	0,8	0,0	5,9	1,6
T-25%	1,0	0,6	0,2	5,9	1,6
T-50%	1,0	0,4	0,4	5,9	1,6
T-75%	1,0	0,2	0,6	5,9	1,6
T-100%	1,0	0,0	0,8	5,9	1,6

FONTE: Autoria Própria.

O preparo da mistura para a realização dos ensaios foi realizado baseado no método especificado pela NBR 16541 (ABNT, 2016), com a diferença que o processo foi feito de forma manual. Primeiramente, a areia seca, a cal hidratada e, quando houvesse, a LRC-S foram misturadas até que formassem uma mistura homogênea. Em seguida, foi adicionado o cimento Portland, misturando novamente até a homogeneização. Depois deste processo, adicionou-se 75% da água necessária e realizou-se a mistura da massa por 90 segundos. Em seguida, a mistura foi deixada em repouso por 90 segundos. Por fim, o restante da água foi adicionado e misturada por mais 60 segundos para, então, ser imediatamente disposta nos moldes utilizados para cada ensaio. Após a moldagem, os blocos foram envoltos por uma lona durante um dia, sendo molhados por duas vezes dentro deste período. No dia seguinte, os espécimes foram desmoldados e submetidos à cura úmida por imersão em água até o momento da realização dos ensaios de tração na flexão, compressão simples, densidade e absorção de água.

2.6 ENSAIO DE CONSISTÊNCIA

Com o intuito de acompanhar a influência da incorporação da LRC-S na consistência da argamassa, o volume de água adicionado na mistura foi mantido constante. Para tanto, os traços foram produzidos conforme método exposto no item 2.5 e, imediatamente antes da moldagem dos espécimes de argamassa, foi realizado o ensaio de consistência pelo espalhamento na mesa (*flow table*), conforme método proposto pela NBR 13276 (ABNT, 2016).

2.7 ENSAIO DE TRAÇÃO NA FLEXÃO E COMPRESSÃO SIMPLES

Com o objetivo de entender o desenvolvimento da resistência mecânica da argamassa ao longo do tempo de cura, foram realizados os ensaios de tração na flexão e compressão simples aos 7 e 28 dias. A moldagem

dos corpos de prova foi realizada conforme descrito pela NBR 13279 (ABNT, 2005). Para tanto, foram produzidos três corpos de prova prismáticos de dimensões 4 cm x 4 cm x 16 cm, por traço e idade, totalizando 30 espécimes. Conforme apresentado pela mesma norma, as partes resultantes dos corpos de prova utilizados para ensaio de tração na flexão (Figura 2a) foram aproveitadas para o ensaio de compressão simples (Figura 2b).

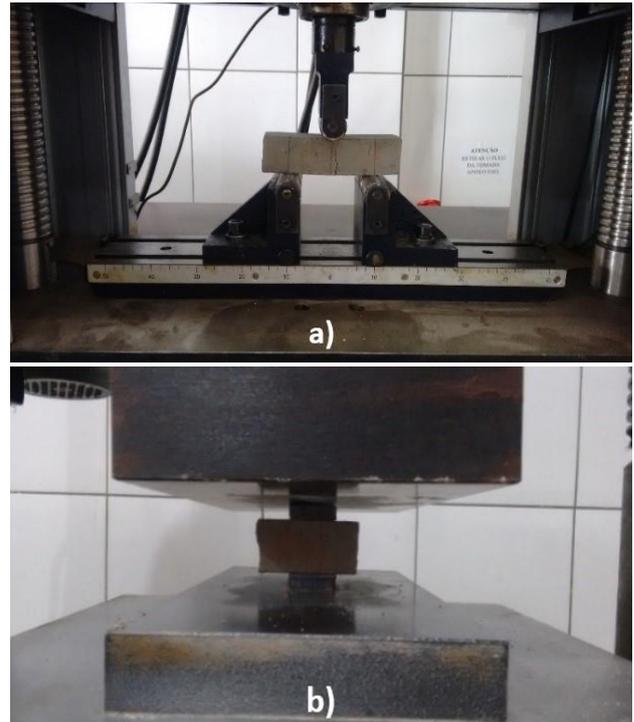


FIGURA 2: [a] Ensaio de tração na flexão e [b] de compressão simples. **FONTE:** Autoria Própria.

2.8 ENSAIOS DE ABSORÇÃO DE ÁGUA POR CAPILARIDADE E DENSIDADE SECA

O ensaio de absorção de água por capilaridade foi realizado apenas aos 28 dias conforme prescrito pela NBR 9779 (ABNT, 2012). Assim sendo, foram utilizados três corpos de prova cilíndricos por traço, com dimensões 50 mm x 100 mm e moldados conforme a NBR 7215 (ABNT, 2019). O ensaio propriamente dito foi realizado aos 28 dias, colocando os corpos de prova em uma estufa à temperatura de 105 ± 5 °C até que houvesse constância de massa. Em seguida, as amostras foram resfriadas em um dessecador, pesadas, e posicionadas sobre um suporte dentro

de um recipiente com água, de modo que ficassem em imersão parcial em uma lâmina d'água constante de 5 mm \pm 1 mm (Figura 3).

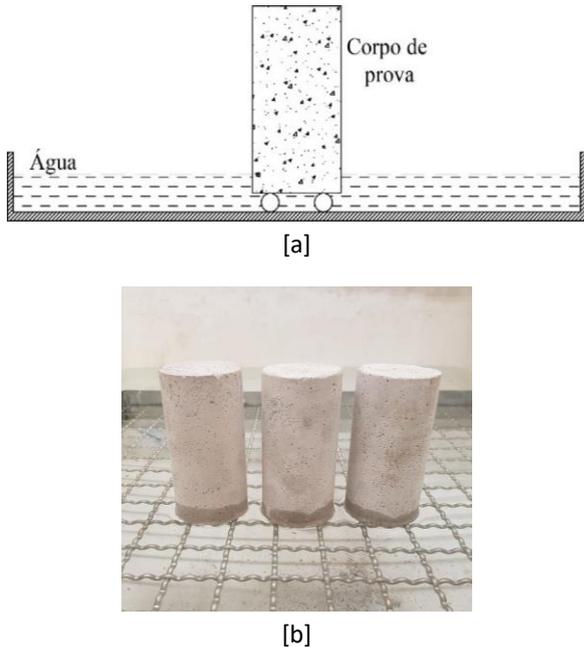


FIGURA 3: [a] Desenho esquemático e [b] foto da execução (b) do ensaio de absorção de água por capilaridade.

FONTE: Autoria Própria.

Vale ressaltar ainda que os corpos de prova empregados para o ensaio de absorção de água foram também utilizados para a determinação da densidade seca da argamassa,

conforme método apresentado pela NBR 13280 (ABNT, 2005).

3. RESULTADOS E DISCUSSÕES

3.1 CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS

3.1.1 Distribuição granulométrica, módulo de finura e densidade de partículas

A distribuição granulométrica da cal hidratada, LRC-S e da areia natural estão exibidas na Figura 4. Já o módulo de finura, dimensão máxima característica e densidade de partículas destes materiais e do cimento Portland estão apresentados na Tabela 3.

Observando as curvas obtidas, foi possível perceber que a LRC-S possui uma distribuição de partículas mais contínua e, portanto, contribui para uma melhor densidade de empacotamento, de forma que as partículas de tamanho menor podem preencher as partículas de tamanho médio, e assim sucessivamente (FRANÇA et al., 2016). Além disso, nota-se que a cal hidratada e a LRC-S obtiveram distribuições granulométricas similares, resultando em módulos de finura e dimensões máximas características próximas.

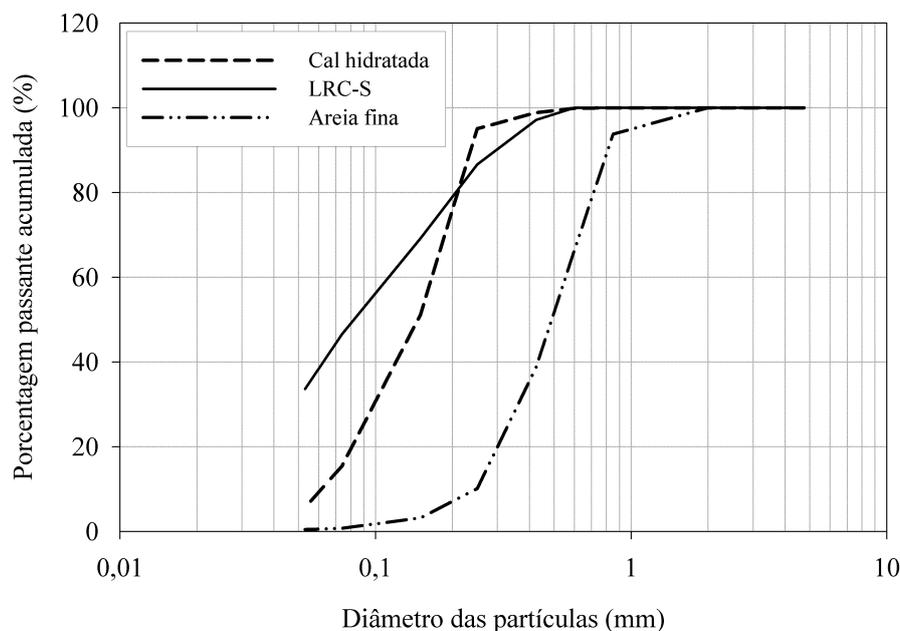


FIGURA 4: Curva granulométrica da cal hidratada (CH), lama residual de concreto seca (LRC-S) e areia fina (AF).

FONTE: Autoria Própria.

TABELA 3: Módulo de finura e dimensão máxima característica da cal hidratada (CH), lama residual de concreto seca (LRC-S) e areia fina (AF).

Descrição	CP	CH	LRC-S	AF
Módulo de finura	-	0,55	0,47	2,88
Dimensão máxima (mm)	-	0,25	0,425	2,36
Densidade de partículas (g/cm ³)	2,86	2,33	2,30	2,82

FONTE: Autoria Própria.

A mesma relação de equivalência pode ser observada na densidade de partículas, visto que a CH e a LRC-S apresentaram, respectivamente, densidades de 2,33 g/cm³ e 2,30 g/cm³. Portanto, é possível verificar que em termos de dimensões de partículas e densidade, a LRC-S e a CH se assemelham, apresentando assim um potencial como um possível substituto.

3.1.2 Ensaio de EDX

A composição química elementar do cimento Portland (CP II Z-32), da cal hidratada

(CH – III), da LRC-S e da areia natural foram determinadas através do ensaio de EDX e estão apresentadas na Tabela 4. Através dos resultados obtidos, foi possível observar que a LRC - S possui altas concentrações de cálcio (Ca) e silício (Si). Como este resíduo é um subproduto de um concreto original, pode-se atribuir estas concentrações encontradas ao óxido de cálcio (CaO) e ao dióxido de silício (SiO₂), que são compostos químicos fortemente presentes na composição do cimento e da areia, respectivamente (XUAN et al., 2016a).

TABELA 4: Caracterização química das parcelas elementares do cimento Portland (CP II Z-32), cal hidratada (CH-III), lama residual de concreto seca (LRC-S) e areia fina (AF).

Elemento	CP II Z-32	CH-III	LRC-S	AF
Ca	71,01	97,18	60,75	0,41
Si	14,81	1,17	22,08	83,17
Fe	6,95	0,77	7,07	3,36
K	2,48	0,30	2,40	5,69
S	1,87	0,02	1,24	0,16
Al	1,25	-	4,02	5,35
Ti	0,68	0,05	0,91	1,45
Sr	0,62	0,30	0,43	0,02
Mn	0,14	0,16	0,74	0,16
Cu	0,04	0,05	0,04	0,05
Ag	0,04	-	0,08	-
Zr	0,03	-	0,07	-
Cr	0,03	-	0,02	0,04
V	0,03	-	0,04	-
Rb	0,02	-	0,05	0,04
Zn	0,01	-	0,05	0,01
Y	0,01	-	0,02	0,01

FONTE: Autoria Própria.

3.2 PROPRIEDADES DA ARGAMASSA

3.2.1 Determinação da consistência

A consistência de uma argamassa é uma propriedade física relacionada com o estado de fluidez da mistura, sendo a facilidade maior ou menor de ser trabalhada (AMBROZEWICZ, 2012). Neste contexto, a determinação do índice de consistência da argamassa em função da adição de resíduos foi determinada (Figura 5). Como esperado, a LRC-S comprometeu seriamente a trabalhabilidade da argamassa, apresentando para uma taxa de substituição de 100% da CH por LRC-S, até 60% de redução do índice de consistência. Este comportamento vai ao encontro dos resultados obtidos por outros autores.

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. Kou, Zhan e Poon (2012b) obtiveram resultado parecido, aumentando até 46% do volume de água adicionado na mistura para substituições de até 100% de agregado miúdo natural por LRC-S em alvenarias. Já Audo, Mahieux e Turcry (2016) constataram que ao se utilizar a

LRC-S em argamassas, era necessária uma porcentagem de superplastificante muito elevada (de 0,5% a 1% da massa de cimento).

Quando comparada com outros materiais usualmente utilizados em misturas de concreto, a LRC-S possui baixa densidade e alta absorção de água, aumentando a demanda por água da mistura (BONFIM et al. 2017). Porém, como a LRC-S e a CH apresentam densidades relativamente próximas, a alta absorção de água da LRC-S se apresenta como o fator determinante para a diminuição da água disponível na mistura.

3.2.2 Resistência à tração na flexão e compressão

Os resultados obtidos no teste de tração na flexão e compressão dos espécimes de argamassa aos 7 e 28 dias foram avaliados através da análise múltipla de médias utilizando o método de Scott - Knott (Tabela 5 e Tabela 6). Este método apresenta a vantagem de separar as médias em grupos estatisticamente semelhantes, sem sobreposição entre eles, exibindo resultados diretos e de fácil interpretação (CANTERI et al., 2001). Assim sendo, foi realizada a comparação entre os traços e entre idades.

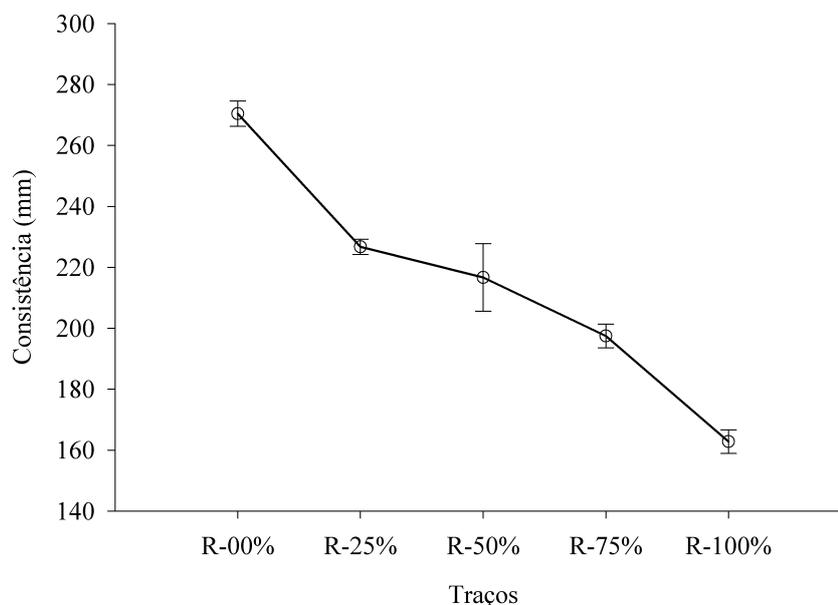


FIGURA 5: Variação do índice de consistência da argamassa em função da incorporação de LRC-S.

FONTE: Autoria Própria.

TABELA 5: Resistência à tração na flexão para argamassas nas idades 7 e 28 dias (Método Scott-Knott, $p = 0,05$).

Traço	Resistência à tração na flexão (MPa)*	
	7 dias	28 dias
T-00%	1,04 ($\pm 0,09$) Aa	1,25 ($\pm 0,15$) Aa
T-25%	1,04 ($\pm 0,11$) Aa	1,20 ($\pm 0,10$) Aa
T-50%	0,85 ($\pm 0,02$) Ba	1,15 ($\pm 0,06$) Aa
T-75%	0,78 ($\pm 0,04$) Ba	0,79 ($\pm 0,05$) Ba
T-100%	0,71 ($\pm 0,06$) Ba	0,86 ($\pm 0,12$) Ba

* As letras maiúsculas mostram a comparação entre as linhas e as letras minúsculas a comparação entre colunas.

FONTE: Autoria Própria.

TABELA 6: Resistência à compressão para argamassas nas idades 7 e 28 dias (Método Scott-Knott, $p = 0,05$).

Traço	Resistência à compressão simples (MPa)*	
	7 dias	28 dias
T-00%	2,01 ($\pm 0,35$) Aa	2,24 ($\pm 0,26$) Aa
T-25%	1,68 ($\pm 0,30$) Ba	1,49 ($\pm 0,19$) Ba
T-50%	1,45 ($\pm 0,28$) Bb	2,08 ($\pm 0,18$) Aa
T-75%	1,80 ($\pm 0,18$) Aa	1,59 ($\pm 0,23$) Ba
T-100%	0,86 ($\pm 0,20$) Cb	1,54 ($\pm 0,29$) Ba

* As letras maiúsculas mostram a comparação entre as linhas e as letras minúsculas a comparação entre colunas.

FONTE: Autoria Própria.

Avaliando especificamente o desenvolvimento da resistência à tração ao longo das idades (Figura 6a), verifica-se que estatisticamente não houve ganho entre as idades, visto que todos os traços ficaram dentro da faixa “a” de resistência. Já com relação ao comportamento à compressão (Figura 6b), apenas os traços T-50% e T-100% apresentaram ganhos de

resistência entre 7 e 28 dias. Este comportamento pode ser explicado pela presença de pozolanas na composição do cimento Portland CP II-Z, visto que estas adições possuem uma hidratação mais lenta e, portanto, a sua utilização pode afetar negativamente o desenvolvimento da resistência à compressão do material nas primeiras idades (KOCÁK; NAS, 2014).

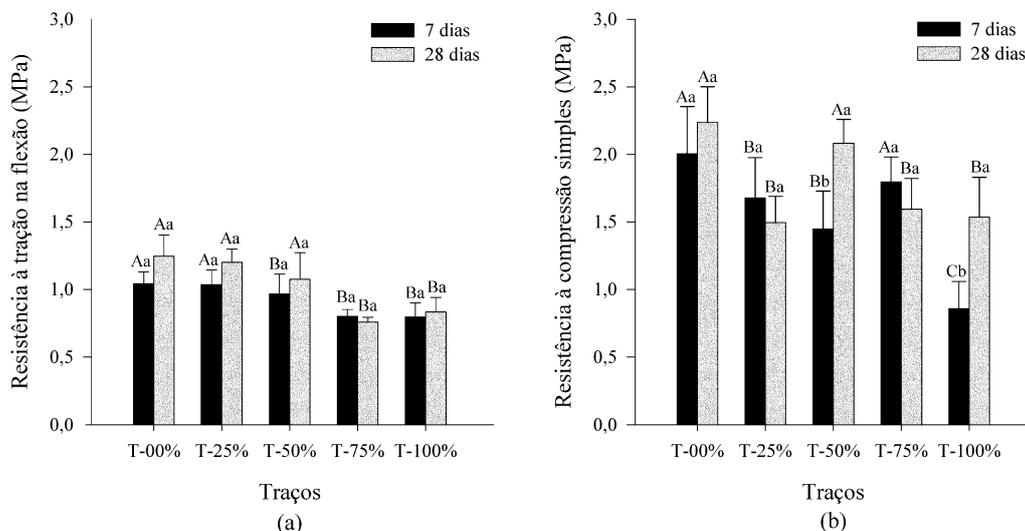


FIGURA 6: Variação da resistência à tração na flexão (a) e à compressão (b) para argamassas nas idades 7 e 28 dias (Método Scott-Knott, $p = 0,05$). As letras maiúsculas mostram a comparação entre os traços e as letras minúsculas a comparação entre as idades.

FONTE: Autoria Própria.

Já com relação à análise entre os traços propostos, verifica-se que aos 28 dias a composição T-50% esteve dentro da faixa “A” tanto à tração, quanto à compressão, obtendo desempenho equivalente ao traço referência. Portanto, nota-se que, apesar da diminuição da trabalhabilidade e consequente diminuição de água disponível para hidratação do cimento, o traço T-50% conseguiu obter desempenho mecânico estatisticamente equivalente à referência. Pode-se atribuir tal comportamento ao fato da LRC-S apresentar maior finura quando comparada com a CH, podendo assim funcionar como um filler (AUDO; MAHIEUX; TURCRY, 2016; KOU; ZHAN; POON, 2012b) e, consequentemente, melhorar o desempenho mecânico do material. Além disso, como apenas uma parte da água utilizada efetivamente reage com o cimento (AMBROZEWICZ, 2012), materiais com alta absorção, apesar de comprometer a trabalhabilidade, retiram o excesso de água da pasta de cimento, diminuindo a porosidade total do material final (COLANGELO; CIOFFI, 2017). Por

outro lado, para taxas superiores à 50% de substituição, foi possível perceber que a baixa disponibilidade de água na mistura comprometeu a hidratação do cimento e, consequentemente, o desempenho mecânico do material.

3.2.3 Absorção de água por capilaridade

O teste de absorção de água por capilaridade tenta simular a absorção capilar de revestimentos quando colocados em contato com água externa (FARINHA; BRITO; VEIGA, 2015). Neste teste, a absorção de água por capilaridade, dada pela razão entre a massa de água absorvida nos primeiros 180 minutos e a área da seção transversal, foi calculada aos 28 dias de idade e os resultados estão apresentados na Figura 7a. Já a variação da densidade seca da argamassa em função da incorporação de resíduos foi realizada a partir da razão entre a massa inicial seca e o volume dos corpos de prova que foram utilizados para a determinação da absorção de água por capilaridade (Figura 7b).

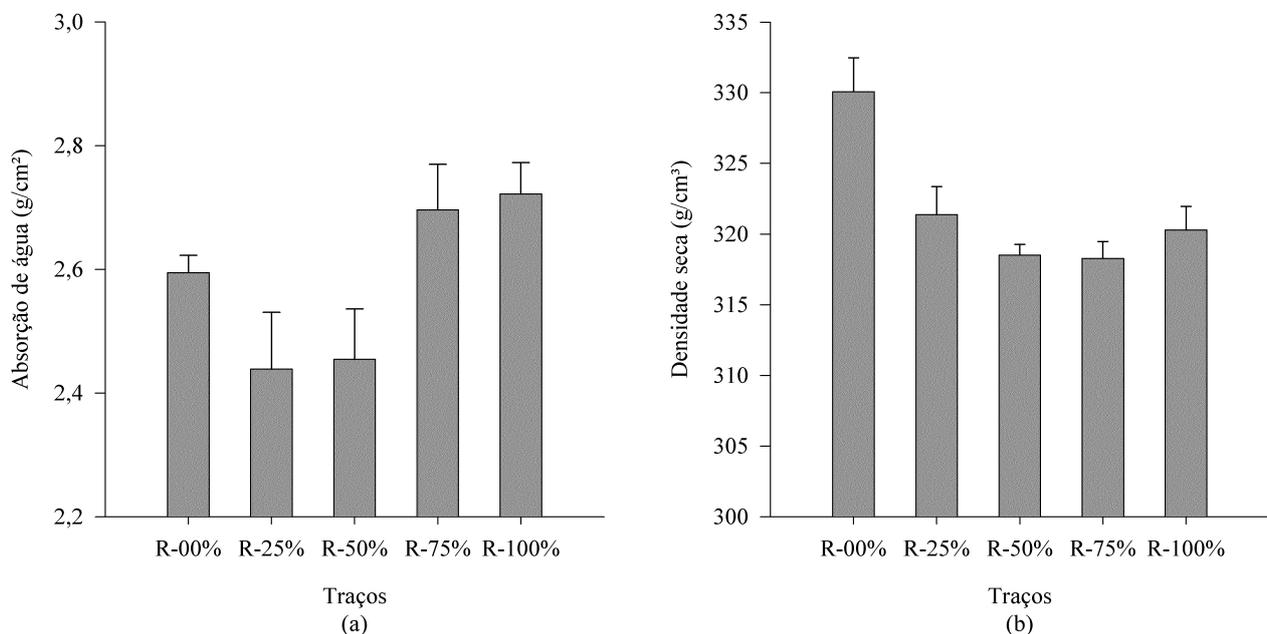


FIGURA 7: Variação da absorção de água por capilaridade (a) e densidade (b) aos 28 dias em função da incorporação de LRC-S.

FONTE: Autoria Própria.

Percebe-se que, em um primeiro momento, com o aumento do teor de resíduo até 50% de substituição, houve um decréscimo da absorção de água capilar da argamassa. Este comportamento pode ser atribuído à capacidade da LRC-S de trabalhar como um filer (AUDO; MAHIEUX; TURCRY, 2016; KOU; ZHAN; POON, 2012b), preenchendo os vazios entre a pasta de cimento e os agregados de areia e, conseqüentemente, diminuindo o tamanho dos poros e a porosidade total (FARINHA; BRITO; VEIGA, 2015). Tal tendência também foi observada quando a LRC-S foi utilizada como substituto ao filer de calcário para produção de argamassas, visto que os traços com adição de resíduos apresentaram porosidade equivalente à referência (AUDO; MAHIEUX; TURCRY, 2016). No entanto, para taxas de substituição superiores a 50%, a absorção capilar da argamassa se tornou maior que a referência. Assim sendo, verifica-se que, para altos volumes de substituição, o comportamento da argamassa é comprometido pela alta porosidade da LRC-S (KOU; ZHAN; POON, 2012b). Nota-se, portanto, uma relação entre o desempenho à tração e à compressão com a absorção de água.

Já com relação à variação da densidade, foi possível perceber que, em um primeiro momento, há uma queda acentuada da densidade, seguida por pequenas variações até a substituição de 100%. Este comportamento pode ser atribuído à diminuição da trabalhabilidade e, conseqüente, diminuição da compacidade do material e pela densidade ligeiramente inferior da LRC-S em comparação com a CH.

4. CONCLUSÕES

As propriedades físicas características da LRC-S se mostraram importantes para os resultados obtidos para os parâmetros de trabalhabilidade e consistência da argamassa. A menor densidade e alta absorção de água impactaram em menores quantidades de água

disponíveis para o molhamento da mistura que, por sua vez, produziu argamassas mais rijas. Contudo, avaliando as propriedades da argamassa no estado endurecido, foi possível perceber que para faixas de substituição da CH pela LRC-S de até 50%, em massa, a argamassa produzida apresentou resistência à tração e à compressão equivalentes e absorção de água por capilaridade inferior ao traço referência. Tal fato pode ser explicado pela diminuição da água na mistura e pelo efeito filer proporcionado pelo resíduo, diminuindo assim a porosidade total do material.

Assim, é possível concluir que, até certos limites, a utilização da LRC-S em argamassas se mostrou viável do ponto de vista técnico, conduzindo a resultados favoráveis à sua aplicação. Nesse contexto, a reintegração desse material no processo produtivo de um bem durável poderá não só reduzir o volume de resíduos sólidos gerados, mas também a demanda por recursos naturais e energéticos. Por outro lado, percebe-se também que as características físicas e químicas dos elementos os constituintes impactam diretamente nas características de trabalhabilidade da argamassa, demonstrando assim a importância de se encontrar alternativas para mitigar os impactos da LRC-S.

5. AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem o apoio concedido pela Universidade Federal de Goiás/ Regional Catalão e pela Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES). Também agradecemos a empresa Brasmix Engenharia de Concretos S/A pelo fornecimento de materiais para realização do estudo.

6. REFERÊNCIAS

ABNT: ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 13276**: Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos - Determinação do índice de consistência. Rio de Janeiro, 2003. 2 p.

- ABNT: ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 13279**: Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos - Determinação da resistência à tração na flexão e à compressão. Rio de Janeiro, 2005. 9p.
- ABNT: ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 13280**: Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos - Determinação da densidade de massa aparente no estado endurecido. Rio de Janeiro, 2005. 6 p.
- ABNT: ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 16541**: Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos - Preparo da mistura para a realização de ensaios. Rio de Janeiro, 2016. 2p.
- ABNT: ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 16697**: Cimento Portland: Requisitos. Rio de Janeiro, 2018. 16p.
- ABNT: ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7175**: Cal hidratada para argamassas – Requisitos. Rio de Janeiro, 2003. 4 p.
- ABNT: ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7211**: Agregados para concreto - Especificação. Rio de Janeiro, 2009. 15p.
- ABNT: ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7215**: Cimento Portland - Determinação da resistência à compressão de corpos de prova cilíndricos. Rio de Janeiro, 2019. 18p.
- ABNT: ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 9779**: Argamassa e concreto endurecidos – Determinação da absorção de água por capilaridade. Rio de Janeiro, 2012. 3p.
- ABNT: ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR NM 248**: Agregados – Determinação da composição granulométrica. Rio de Janeiro, 2003. 6 p.
- 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**, [s.l.], v. 112, p.790-799, jun. 2016.
- BONFIM, W. B.; BALDIN, V.; PEREIRA, R. R.; PAULA, H. M. de. LAMA RESIDUAL DE USINAS DE CONCRETO: CARACTERÍSTICAS E APLICAÇÕES NA CONFECÇÃO DE BLOCOS. **Reec - Revista Eletrônica de Engenharia Civil**, [s.l.], v. 13, n. 2, p.32-43, 4 abr. 2017.
- CANTERI, M. G. et al. Sasm-agri: Sistema para análise e separação de médias em experimentos agrícolas pelos métodos scott-knott, tukey e duncan. **Revista Brasileira de Agrocomputação**, [s.l.], v. 1, n. 2, p. 18–24, 2001.
- COLANGELO, F.; CIOFFI, R. Mechanical properties and durability of mortar containing fine fraction of demolition wastes produced by selective demolition in South Italy. **Composites Part B: Engineering**, [s.l.], v. 115, p.43-50, abr. 2017.
- 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**, [s.l.], v. 29, n. 11, p.2886-2891, nov. 2009.
- EMBRAPA: EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA, **Manual de métodos de análise de solo**, 2 ed., Rio de Janeiro, EMBRAPA-CNPQ, 2011.
- FARINHA, C.; BRITO, J. de; VEIGA, R. Incorporation of fine sanitary ware aggregates in coating mortars. **Construction And Building Materials**, [s.l.], v. 83, p.194-206, maio 2015.
- FRANÇA, D. F. S.; REY, R. O.; FERREIRA, L. R. C.; RIBEIRO, V. R. Avaliação da reologia, da RAA e das propriedades de argamassas no estado fresco utilizando cinza de eucalipto como substituição parcial ao cimento Portland. **Ambiente Construído**, [s.l.], v. 16, n. 3, p.153-166, set. 2016.
- 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**, [s.l.], v. 131, p.721-740, jan. 2017.
- KOCAK, Y.; NAS, S. The effect of using fly ash on the strength and hydration characteristics of blended cements. **Construction And Building Materials**, [s.l.], v. 73, p.25-32, dez. 2014.
- KOU, S.; ZHAN, B.; POON, C. Feasibility study of using recycled fresh concrete waste as coarse aggregates in concrete. **Construction And Building Materials**, [s.l.], v. 28, n. 1, p.549-556, mar. 2012a.
- KOU, S.; ZHAN, B.; POON, C. Properties of partition wall blocks prepared with fresh concrete wastes. **Construction And Building Materials**, [s.l.], v. 36, p.566-571, nov. 2012b.
- POON, C.; KOU, S.; LAM, L. Use of recycled aggregates in molded concrete bricks and blocks. **Construction And Building Materials**, [s.l.], v. 16, n. 5, p.281-289, jul. 2002.
- RUGHOPUTH, 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**, [s.l.], 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, pp.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**, [s.l.], v. 2013, p.1-5, 2013.

TOLEDO FILHO, R. D.; GONÇALVES, J. P.; AMERICANO, B. B.; FAIRBAIRN, E. M. R. Potential for use of crushed waste calcined-clay brick as a supplementary cementitious material in Brazil. **Cement And Concrete Research**, [s.l.], v. 37, n. 9, p.1357-1365, set. 2007.

VIEIRA, L. B. P., FIGUEIREDO, A. D., “Resíduos da Concreteira: o aproveitamento do problema”, **Revista Concreto IBRACON**, v. 22, pp.49-53, Set. 2013

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**, [s.l.], 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**, [s.l.], v. 312, p.65-72, jul. 2016b.