

Utilização de lodo tratado de indústria de produtos de limpeza em matrizes cimentícias

Use of treated sludge from cleaning products industry in cementitious matrices

José Daniel Jales Silva¹, María del Pilar Durante Ingunza¹,
Liana Filgueira Albuquerque², Paulo Alysson Brillhante Faheina de Souza¹,
Luiza Gabriela Galvão de Medeiros³

¹ Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Av. Senador Salgado Filho, 3000, CEP: 59078-970, Natal, Rio Grande do Norte, Brasil.

² Universidade Federal da Paraíba, Departamento de Tecnologia, Jardim Universitário, s/n, CEP: 58051-900, João Pessoa, Paraíba, Brasil.

³ Universidade Federal Rural do Semi-Árido, Departamento de Ciências Ambientais e Tecnológicas, Av. Francisco Mota, 572, CEP: 59625-900, Mossoró, Rio Grande do Norte, Brasil.

e-mail: josedanieljales@gmail.com, durante@ct.ufrn.br, liana.filgueira@gmail.com, pauloalyssonsouza@gmail.com, luizagmedeiros@hotmail.com.

RESUMO

A geração de resíduos industriais tem aumentado continuamente motivando estudos sobre uma destinação ambientalmente correta e sustentável. Como exemplo existem os resíduos gerados em fábricas de produtos de limpeza. Com o intuito de avaliar o potencial de incorporação de lodo de uma indústria deste setor como filer para a fabricação de concretos convencionais, foram adicionados diferentes teores de lodo (5, 10, 15 e 20%) em um traço 1:2:3 (cimento:areia:brita). Foram avaliadas as propriedades mecânicas e de durabilidade destes concretos nos estados fresco e endurecido. Todos os concretos produzidos com o resíduo apresentaram aumento de trabalhabilidade atribuído à possível presença de surfactantes na composição dos efluentes. Entretanto, foram obtidas resistências à compressão inferiores ao concreto referência com evidências de um aumento na porosidade da zona de transição e maior formação do composto etringita na microestrutura. Para o máximo teor de adição, a redução na resistência foi cerca de 39%. A absorção de água e índice de vazios aumentaram levemente para todos as misturas, com exceção do concreto com 20% de lodo. A adição do resíduo na matriz cimentícia provocou uma redução na durabilidade. Como avaliação final, o teor máximo de adição recomendado é de 20%, constituindo uma proporção significativa para destinação do resíduo, entretanto, os concretos produzidos não podem ser utilizados para fins estruturais.

Palavras-chave: Concreto. Lodo Industrial. Sustentabilidade.

ABSTRACT

The generation of industrial waste has increased continuously encouraging studies about a sustainable and environmentally correct destination to it. As an example, there are the waste generated in cleaning product factories. Aiming to evaluate the incorporation potential of a sludge from an industry of this sector as filler for conventional concretes production, different sludge content was added (5, 10, 15, 20%) in a proportion 1:2:3 (cement:sand:gravel). The mechanical and durability properties of these concretes were evaluated in the fresh and hardened states. All concretes produced with residue showed an increase of workability attributed to the possible presence of surfactants in the composition of effluents. However, compressive strengths lower than the reference concrete were obtained with evidence of an increase in the porosity of the transition zone and greater formation of the compound ettringite in microstructure. For maximum addition content, the reduction in resistance was about 39%. The water absorption and void ratio have slightly increased for all the

mixtures, except concrete with 20% sludge. The addition of the residue in the cementitious matrix caused a reduction in durability. As a final evaluation, the maximum addition content recommended is 20%, constituting a significant proportion for waste disposal, however, the produced concretes cannot be used for structural purposes.

Keywords: Concrete. Industrial Sludge. Sustainability.

1. INTRODUÇÃO

Com a evolução nos estudos sobre o gerenciamento de resíduos, não somente uma mitigação dos impactos causados na disposição final, mas também, sua redução, reutilização e reciclagem são soluções sustentáveis e necessárias no contexto atual [1]. Entretanto, tais medidas ainda são implementadas em pequena escala e, aliadas à crescente geração de resíduos, exigem um eficiente sistema de gerenciamento [2].

Para GUAN *et al.* [3] embora haja um aumento na produção de resíduos industriais em decorrência da industrialização e do rápido crescimento econômico, medidas de prevenção e tratamento desses resíduos não tem recebido a atenção necessária em virtude de seus efeitos tardios no meio ambiente. A estocagem desses materiais em aterros não somente necessita de grandes áreas como também são fontes poluidoras para o sistema local [4].

No Brasil, a Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS), publicada pela Lei N° 12.305/2010, instituiu a destinação ambientalmente adequada, abordando a reutilização como uma das primeiras opções na ordem preferencial de gerenciamento dos resíduos e enfatizando a responsabilidade dos geradores no processo [5]. No setor industrial, os elevados custos inerentes aos processos de tratamento e disposição tem levado a busca por novas alternativas de reaproveitamento. Os processos de reciclagem e reutilização permitem que esses resíduos se tornem novamente matéria-prima e sejam reinseridos no fluxograma de produção das indústrias [6].

Com a busca de materiais potencialmente receptores para os rejeitos gerados, os concretos e argamassas se destacam. As razões são, entre outras, a possibilidade de melhoria nas propriedades desses compósitos, capacidade de imobilização do resíduo na matriz endurecida [7] e redução na utilização de matérias-primas associadas a altos índices de poluição em seus processos de produção, como é o caso do cimento Portland [8]. Estima-se que a produção do cimento seja a terceira maior fonte antropogênica de emissão de CO₂ [9], sendo responsável por até 8% da emissão global desse poluente e contribuindo para o agravamento da crise ambiental [10].

Diversas pesquisas já foram conduzidas com o propósito de estudar a incorporação de resíduos sólidos em compostos cimentícios, é o caso dos resíduos de construção e demolição [11], plásticos [12], borracha de pneu [13], escória de aciaria [14], lodos de estações de tratamento de água (ETA), esgoto (ETE) e efluentes industriais, resíduos da biomassa (cinza da casca do arroz, cinza do bagaço da cana de açúcar), pó de vidro, filer calcário, pó de porcelanato, entre outros [15, 16]. Alguns desses materiais possuem propriedades pozolônicas que auxiliam no ganho de resistência dos compostos além de emitirem menores quantias de poluentes durante sua geração [17].

No caso dos lodos, seu destino final envolve uma série de medidas e estudos que estão relacionados com sua composição, acondicionamento, estabilização, bem como, impactos ambientais causados, no sentido de evitar a configuração de uma fonte de poluição secundária [18]. A incorporação de lodos em concretos pode trazer sensíveis alterações às características físico-mecânicas desse compósito. Em princípio, o estado em que o material se encontra no momento da mistura e sua origem são fatores preponderantes. Enquanto lodos de tratamento de água e esgoto são utilizados, geralmente, na forma de cinzas, determinados resíduos de origem industrial podem ser aproveitados em sua condição natural.

A cinza de lodo de ETA, quando incorporada à composição dos concretos causa uma redução da trabalhabilidade e resistência à compressão aos 28 dias, bem como um aumento na porosidade do material endurecido, sendo viável apenas para teores abaixo dos 10% [19]. Esse comportamento é atribuído, principalmente, à matriz mais porosa da cinza, que acaba gerando uma maior porosidade e absorção da pasta de cimento hidratada [20].

De eficiência comprovada, a cinza do lodo de esgoto, por sua vez, pode ser utilizada satisfatoriamente como material complementar na fabricação de cimentos, como agregado leve em concretos, agregado miúdo, filer e até mesmo em concretos de alto desempenho [21]. Já quando o lodo de ETE é incorporado da forma como é coletado nas estações de tratamento, em condição natural e seca, é constatada uma redução na resistência dos concretos com o aumento no teor de lodo atribuída à alta quantidade de matéria orgânica presente nesse material e que pode afetar também a trabalhabilidade e o tempo de pega das misturas [22].

Para os lodos gerados no tratamento de efluentes industriais, pesquisas como as de XI *et al.* [23], VASHISTHA *et al.* [24], VARDHAN, SIDDIQUE e GOYAL [25], MASHALY, SHALABY e RASHWAN [26], KAISH, BREESEM e ABOOD [27], MASHALY *et al.* [28], ROSLAN *et al.* [29], SOGANCIOGLU *et al.* [30], ZHAN e POON [31] e WONG *et al.* [32] reforçam a ideia de que as características físico químicas do resíduo e, conseqüentemente, sua influência no concreto irão depender principalmente da matéria-prima utilizada pela indústria e dos processos envolvidos na sua geração.

Em estudo sobre a viabilidade de substituição do cimento por lodo da produção de mármore, XI *et al.* [23] confeccionaram misturas de argamassa e lodo em teores de 10%, 20% e 30%, em substituição ao aglomerante, avaliando as propriedades do material no estado fresco e endurecido. O resíduo foi considerado como um potencial filler, a ser incorporado nas argamassas, em função de suas propriedades como finura, composição química e reatividade, além de baixa influência na resistência.

Outro resíduo industrial com alto potencial para reutilização em materiais cimentícios é o lodo de cal produzido em fábricas de papel que pode ser usado na sua condição natural para fabricação de clínquer. Além disso, quando calcinado gera-se metacaulim um composto com elevada atividade pozolânica [33]. VASHISTHA *et al.* [24], em um artigo de revisão sobre esse material, avaliaram diversos trabalhos e concluíram que o lodo de cal pode ser utilizado com eficiência para substituir aglomerantes e agregados miúdos na produção de concretos e argamassas em teores de até 30%.

O lodo resultante do beneficiamento de pedras ornamentais é outro material amplamente estudado como substituto ao cimento na produção de pasta de cimento, concretos e argamassas. Para avaliar as propriedades físicas-mecânicas e durabilidade de misturas com esse resíduo, MASHALY, SHALABY e RASHWAN [26] prepararam misturas com até 40% de substituição. Para as misturas de concreto, o teor ótimo encontrado foi de 20%, que apresentou pouca influência na resistência além de aumento na durabilidade quanto ao ataque por sulfatos.

A presença de elementos adicionados na linha de produção ou no tratamento dos efluentes podem afetar o desempenho de materiais cimentícios e, nesse caso, algum pré-tratamento pode ser usado para superar esse problema. ZHAN e POON [31] verificaram que a amônia presente em lodos de efluente têxtil seria a principal responsável pela redução na resistência à compressão de blocos de concretos com lodo em substituição ao agregado miúdo. Um tratamento prévio com cal foi capaz de reduzir os teores desse elemento e mitigar a sua ação deletéria nas propriedades dos blocos.

CAPPELLESSO *et al.* [34] investigaram a utilização de um lodo de efluente de indústrias de papel em matrizes cimentícias, argamassas rica e pobre, em teores de até 10%. O material foi calcinado a uma temperatura de 400°C apenas para eliminar a matéria orgânica proveniente de fibras de material celulósico. A adição do lodo resultou em maior resistência à compressão e tração além de redução na absorção de água, entretanto, houve um aumento da relação água/cimento e consumo de cimento necessários para manter a consistência e resistência das misturas respectivamente.

Com isso, é visível a grande versatilidade que os materiais como concretos e argamassas tem em incorporar, de forma eficiente, resíduos variados em sua matriz endurecida, evitando assim, que sejam dispostos em aterros sanitários e outras soluções que visam apenas seu confinamento. Um caso particular são os efluentes gerados pelas indústrias de produtos de limpeza e que contém significativas quantidades de materiais orgânicos, surfactantes, sólidos suspensos e turbidez. Esses componentes também estão presentes no lodo resultante do tratamento nas estações e podem causar grandes impactos quando dispostos de forma inadequada, principalmente no que tange o ambiente aquático [35, 36].

Para o tratamento desses efluentes geralmente são utilizados processos de coagulação e floculação como tratamento primário que utilizam substâncias à base de ferro e alumínio. Porém, devido à diversidade de surfactantes existentes, é difícil determinar um único e efetivo tratamento para efluentes que contenham tais substâncias [37, 38]. Por outro lado, essas substâncias estão sendo amplamente utilizadas por indústrias como as do setor têxtil, farmacêutico, e até de mineração. Em 2006, a produção mundial de surfactantes já alcançava a marca de cerca de 12,5 milhões de toneladas por ano [39].

Embora vários sejam os efeitos negativos comprovados desses compostos sobre o meio ambiente, fauna e até mesmo seres humanos [40], não há estudos específicos sobre o reaproveitamento de lodos dessa natureza em outros materiais. Assim, pode ser levantado o questionamento sobre a sua viabilidade de incorporação em matrizes cimentícias como os concretos convencionais, e sua influência nas propriedades físicas, mecânicas e de durabilidade desse compósito.

A presença de surfactantes em um líquido, mesmo que em baixas quantidades, pode causar a quebra da tensão superficial. Essa propriedade se dá em função da existência de uma parte polar e outra apolar na mesma molécula [41]. Logo, sua introdução na mistura de concretos pode influenciar reduzindo a tensão su-

perifical e causando a incorporação de ar na massa alterando a trabalhabilidade, de maneira similar ao que ocorre na utilização de aditivos plastificantes [42]. Com isso, o objetivo deste trabalho é desenvolver uma pesquisa científica para avaliar a potencialidade de incorporação de lodo, oriundo de indústrias do setor de produtos de limpeza, em concretos de cimento Portland, como forma de mitigar os impactos negativos da disposição inadequada desse resíduo no meio ambiente.

2. MATERIAIS E MÉTODOS

A metodologia da pesquisa foi dividida em duas etapas. A primeira se deu com a visita a empresa e coleta do resíduo, seguida de sua preparação e caracterização. Na etapa seguinte, os demais materiais necessários para a produção dos concretos (cimento, agregados miúdo e graúdo), foram separados e caracterizados. Por fim, procedeu-se a etapa de produção das misturas com confecção dos corpos de prova e realização dos ensaios no estado fresco e endurecido.

2.1 Coleta e caracterização do resíduo

O lodo utilizado neste trabalho é resultante do tratamento de efluentes em uma indústria química que fabrica produtos de limpeza domésticos e industriais localizada no nordeste brasileiro. O efluente resultante principalmente da lavagem dos equipamentos de produção, como os tanques de mistura, é destinado, por meio de instalações, até a ETE do local onde é submetido a uma série de tratamentos físico-químicos até que seja obtido o particulado sólido.

Inicialmente, o efluente é direcionado para tanques de equalização que permitem a regularização das vazões para os cilindros floco-decantadores. Logo após, são dosados, através de bombas, os reagentes de coagulação, Policloreto de Alumina (PAC) e Hidróxido de Cálcio (Cal), nos pontos de grande turbulência no interior da tubulação onde um polieletrólito específico complementa o processo de tratamento. Em seguida, o líquido é bombeado para os leitos de secagem o qual deriva o lodo. Por fim, o material já com reduzido teor de umidade é disposto em pilhas para então ser transportado ao aterro sanitário. Um esquema do processo de obtenção do lodo seco é mostrado na Figura 1.

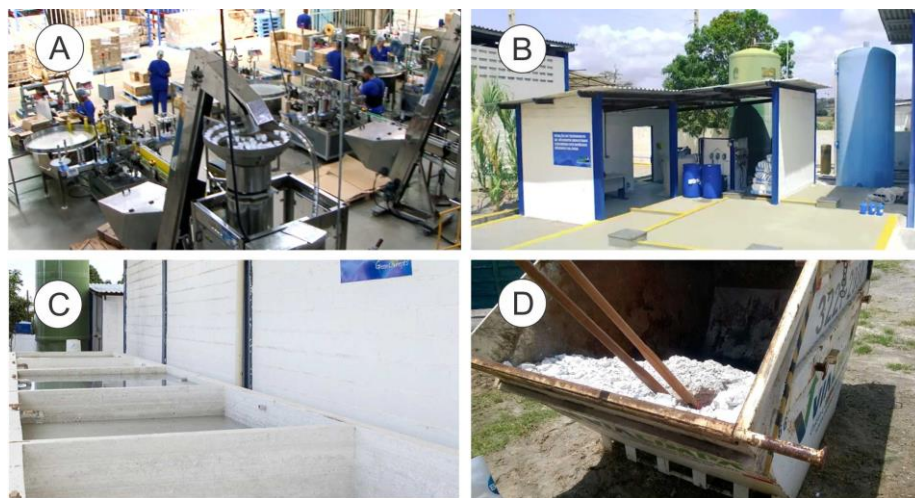


Figura 1: Esquema com os processos para obtenção do lodo; a) Linha de Produção; b) Estação de Tratamento; c) Leitos de Secagem; d) Descartes e Coleta de Lodo Seco.

O resíduo utilizado foi coletado de uma pilha com descartes relativos ao período de dois meses, garantindo uma maior homogeneidade frente às sazonalidades da linha de produção. O processo se deu em conformidade com a NBR 10007 [43]. Quanto ao beneficiamento do material para os ensaios de caracterização e utilização no concreto, realizou-se, inicialmente, um processo de secagem em estufa a 110°C por um período de 24 horas seguido de quarteamento, homogeneização e destorroamento. Para este resíduo foram realizados ensaios de análise granulométrica por difração a laser e peneiramento [44], massa específica real [45], limites de liquidez e plasticidade [46, 47], índice de atividade pozolânica [48, 49] e teor de matéria orgânica, além de ensaio químico de fluorescência de Raios X (FRX) e mineralógico de difração de Raios X (DRX).

No ensaio de FRX foi utilizado um equipamento EDX-720 da marca Shimadzu de energia dispersiva equipado com um tubo de Ródio (Rh), voltagem 50 kV, corrente de 500 a 1000µA e detector de Si(Li) capaz de identificar elementos compreendidos entre o Sódio (11) e Urânio (92). Além disso, foi avaliada a perda ao

fogo aquecendo-se o material até 1000°C por 60 minutos.

A análise mineralógica por DRX foi realizada em equipamento Shimadzu XRD-6000 com radiação CuK α , varredura de 2°/min, passo de 0,05° e 2 θ de 10° a 60°. Para a identificação das fases mineralógicas utilizou-se o software X'Pert HighScore. Resultados de ensaios de lixiviação e solubilização também foram obtidos com a empresa geradora para permitir a avaliação do potencial contaminante do resíduo.

2.2 Cimento e agregados

O cimento utilizado nesta pesquisa foi o Portland de alta resistência inicial e resistente a sulfatos (CP V ARI RS). Os ensaios utilizados para comprovar a viabilidade do cimento foram: determinação do índice de finura [50], tempo de início de pega [51], expansibilidade a frio [52], resistência à compressão axial [53] e determinação da massa específica real [54]. Os resultados desses ensaios estão mostrados na Tabela 1 e comparados com os limites da NBR 16697 [55].

Tabela 1: Propriedades do cimento.

PROPRIEDADES DO CIMENTO CP V ARI RS		LIMITES DA NBR 16697
Tempo de início de pega (min)	60	≥ 60
Expansibilidade a frio (mm)	0,00	-
Finura do Cimento (%)	1,08	≤6,00
Resistência à compressão aos 7 dias (MPa)	34,20	≥34,00
Massa específica real (g/cm ³)	3,00	-

O agregado miúdo utilizado para a confecção dos concretos foi uma areia quartzosa de origem natural, já o agregado graúdo foi uma brita com mineralogia granítica. Realizou-se análise granulométrica em conformidade com as prescrições da NBR NM 248 [44], além de ensaios de determinação da massa específica real e massa unitária de acordo, respectivamente, com as normas NBR NM 52 e 53 e NBR NM 45 [45, 56, 57]. Os resultados desses ensaios são apresentados na Tabela 2.

Tabela 2: Propriedades dos agregados miúdo e graúdo.

PROPRIEDADES	AGREGADOS	
	MIÚDO	GRAÚDO
Módulo de Finura	2,87	6,84
Diâmetro Máximo Característico (mm)	4,80	19,00
Massa Específica Real (g/cm ³)	2,60	2,64
Massa Específica Unitária (g/cm ³)	1,47	1,47

2.2 Produção e avaliação dos concretos

Para a realização dessa pesquisa foi fixado um traço base com proporções em massa de 1:2:3 (cimento: areia: brita), para uma relação água/cimento de 0,65. A escolha desse traço ocorreu em virtude de pesquisas anteriores como a de LIMA e INGUNZA [58] terem constatado se tratar de uma mistura com boas características de resistência mecânica, economia e de fácil preparo. Os teores de resíduo incorporado, visando a avaliação das implicações técnicas e ambientais desse processo, se deram em valores de 5%, 10%, 15% e 20% em relação à massa de cimento utilizado nas misturas, além do traço de referência com 0% de resíduo. Na Tabela 3 estão ilustrados todos os traços utilizados e os respectivos consumos de materiais. Para cada adição de lodo industrial foram produzidos ao total 14 corpos de prova cilíndricos com dimensões de 10cm de diâmetro por 20cm de altura.

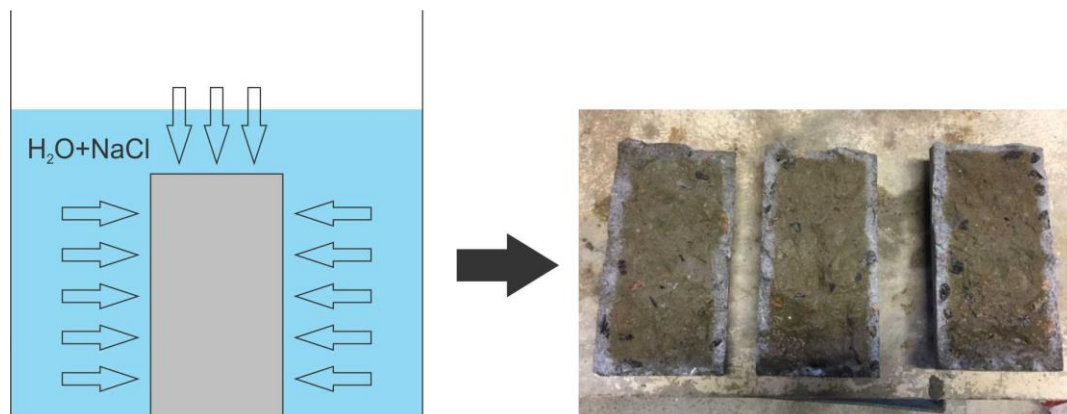
A mistura dos materiais foi realizada em uma betoneira de eixo inclinado e não foram utilizados aditivos plastificantes no processo. Para os traços em que se adicionou o lodo industrial, este foi misturado previamente ao cimento em um recipiente de plástico. A moldagem dos corpos de prova ocorreu segundo os procedimentos da NBR 5738 [59], sendo mantidos durante 24 horas em ambiente protegido do sol e ventilado. Após isso, procedeu-se com o desmolde e processo de cura por submersão em água limpa à temperatura ambiente e sem controle.

Tabela 3: Consumo de materiais para as misturas produzidas.

DENOMINAÇÃO	CONSUMO DE MATERIAIS EM KG/M ³				
	CIMENTO	AREIA	BRITA	ÁGUA	LODO IND.
REF0L	345,80	691,60	1037,40	224,80	0,00
A5L	342,90	685,80	1028,70	222,90	17,15
A10L	340,10	680,20	1020,30	221,10	34,01
A15L	337,20	674,40	1011,60	219,20	50,58
A20L	334,50	669,00	1003,50	217,40	66,90

No estado fresco realizou-se o ensaio de abatimento do tronco de cone (*Slump Test*) de acordo com os procedimentos descritos na NBR NM 67 [60]. Já no estado endurecido, foram conduzidos ensaios de resistência à compressão [61] e absorção de água [62] com utilização de 3 corpos de prova para cada idade 7, 14 e 28 dias. Além disso, realizou-se análise microestrutural nas amostras com 20%, por se tratar da mistura com maior teor de resíduo, através de microscopia eletrônica de varredura (MEV) em equipamento Shimadzu SSX-550 Superscan com detecção de elétrons secundários, operando a uma voltagem de aceleração de 20 kV e aumentos de até 2000 vezes. O material foi previamente preparado por secagem em estufa e metalização com ouro no intuito de otimizar o contraste de visualização.

Para avaliação da durabilidade dos concretos referência e com 20% de resíduo aplicou-se o ensaio acelerado de penetração de íons cloreto por submersão em solução com 3,5% de cloreto de sódio em relação à massa de água, concentração média de sais no ambiente marinho (Figura 2) [63]. Esse procedimento se baseia no princípio da difusão dos íons através dos corpos de prova similar ao adotado na norma NT Build 443 [64] com a ressalva de que neste trabalho a exposição aos cloretos foi permitida em todas as faces do corpo de prova. Já a identificação da frente de penetração foi conduzida pelo método colorimétrico com aspersão de uma solução de nitrato de prata a 0,1M na superfície interna dos concretos como introduzido por OTSUKI, NAGATAKI e NAKASHITA [65] e avaliado por KIN, YANG e YI [66] e REAL *et al.* [67] como um método adequado. Por fim, a profundidade de penetração de cloretos nas idades de 7, 28 e 60 dias foi obtida pela medição com paquímetro em 9 pontos da amostra, sendo considerada a média dos valores obtidos.


Figura 2: Exposição dos corpos de prova à solução com cloretos e ensaio colorimétrico.

A etapa de análise dos dados foi conduzida através da aplicação de métodos estatísticos como análise de variância e testes de hipóteses (teste de Tukey) para verificação das diferenças de resistência entre os grupos estudados.

3. RESULTADOS E DISCUSSÕES

3.1 Caracterização do resíduo

A curva granulométrica do lodo industrial está mostrada na Figura 3. Para comparação também são representadas as curvas do agregado miúdo utilizado e do cimento CPV ARI RS do trabalho de MEDEIROS [68], o mesmo utilizado nesta pesquisa. É possível verificar que a curva do lodo está situada na zona intermediária, entre esses dois materiais. O módulo de finura encontrado foi de 1,40, confirmando o que a análise visual já

indicava, se tratar de um material de alta finura. Além disso, a dimensão máxima característica foi de 2,4 mm, ambos os parâmetros são inferiores aos da areia natural. Pesquisadores como VARDHAN, SIDDIQUE e GOYAL [25], MASHALY, SHALABY e RASHWAN [26] também encontraram uma granulometria com alto teor de finos para materiais resultantes de processos de sedimentação.

Analisando as características físicas do lodo pode ocorrer um melhoramento dos concretos através do efeito filler. Nesse caso, as partículas menores do material funcionam como pontos de nucleação para os compostos hidratados do cimento que se formam durante a cura em regiões de maior área superficial e energia, acelerando as reações de hidratação nas primeiras idades [69].

Segundo GONÇALVES [70] as partículas de filler situadas em uma faixa granulométrica inferior a 50 μm contribuem para um melhoramento da matriz cimentícia, através do preenchimento dos vazios que existem entre os produtos de hidratação do cimento, ou devido a não hidratação de parte do material. Já as partículas de diâmetros médios entre 50 μm e 150 μm agem complementando descontinuidades na curva granulométrica do agregado miúdo. Assim, em razão também das diferenças granulométricas entre os materiais há um alto potencial de preenchimento dos vazios da mistura.

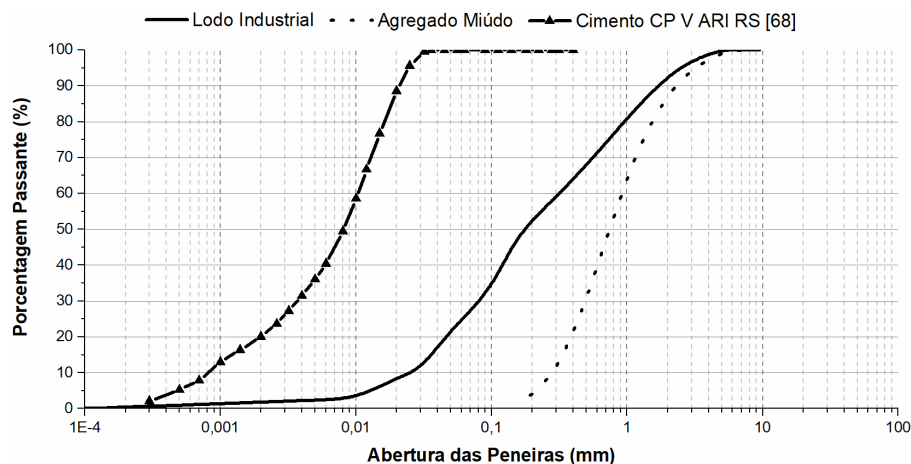


Figura 3: Curva granulométrica do lodo industrial comparada com as do agregado miúdo e cimento utilizados.

O resíduo é composto principalmente por cálcio e magnésio (Figura 4), bem como alumínio, que representam juntos cerca de 47% da amostra (Tabela 4). Já as fases cristalinas foram identificadas comparando-se os picos do difratograma com os padrões das fichas *Powder Diffraction Files* (PDF). Foram identificados os minerais calcita (43-0697), quartzo (83-2471), dolomita (79-1344), millosevichita (42-1428), chloroapatita (01-1011) e hydroxyllestadita (77-1008). As significativas quantidades de cálcio na forma de calcita e alumínio são decorrentes, provavelmente, da cal e PAC, respectivamente, adicionados no tratamento do efluente industrial. Já o magnésio é uma substância amplamente usada na composição dos produtos de limpeza. Os minerais de composição mais complexa como a chloroapatita e hydroxyllestadita, são minerais de origem sintética, provavelmente derivados de substâncias utilizadas na fabricação dos produtos de limpeza, assim como, dos aditivos incorporados no tratamento do efluente.

A dolomita é um mineral que tem a capacidade de reagir com os álcalis do cimento, onde é dissolvida para então formar carbonato de cálcio. Este último pode se combinar com o composto C_3A do cimento para formar carbo-aluminatos de cálcio que proporcionam um ganho de resistência ao concreto [25, 71].

Analisando a atividade pozolânica do resíduo através de parâmetros químicos, e levando em consideração os requisitos especificados na NBR 12653 [72], é possível inferir uma baixa reatividade quando incorporado ao concreto. Somando-se os teores de SiO_2 , Al_2O_3 e Fe_2O_3 o material não se enquadra em nenhuma das classes especificadas na norma (N, C ou E). O índice de atividade pozolânica obtido através do procedimento descrito na NBR 5752 [49] foi de 71% que é inferior aos 90% mínimos exigidos para classificação como material pozolânico. Já no ensaio com a cal obteve-se uma resistência à compressão de 0,5 MPa, valor inferior ao requerido na NBR 5751 [48] que é de 6 MPa.

O padrão de difração obtido no ensaio de DRX é característico de um material cristalino, com picos bem definidos e diversas fases identificadas, diferentemente do encontrado em materiais amorfos ou de menor cristalinidade onde o padrão é constituído de picos mais achatados e alongados [73] o que reforça a hipótese de pequena atividade pozolânica do resíduo. A quantidade de matéria orgânica está acima do permitido

para agregados utilizados em concreto e disposto na NBR 7211 que é de 10%. A presença de compostos orgânicos em grande quantidade pode influenciar nas reações de hidratação do cimento, geralmente retardando o tempo para que essas reações ocorram [74].

Outro aspecto importante é a elevada perda ao fogo do material, superior a 10%, valor máximo estipulado na NBR 12653 [72] para materiais pozzolânicos da classe N. Esse parâmetro é obtido pelo aquecimento da amostra previamente seca até 1000°C por 60 minutos o que provoca a remoção de compostos baseados em carbono como a calcita presente em grande quantidade no lodo estudado [73].

De maneira geral, o lodo analisado tem características químicas relacionadas a outros resíduos já estudados, é o caso do lodo da fabricação de mármore [23], papel [24] e do lodo proveniente de ETAs [19], que na condição natural são utilizados como fillers nas misturas.

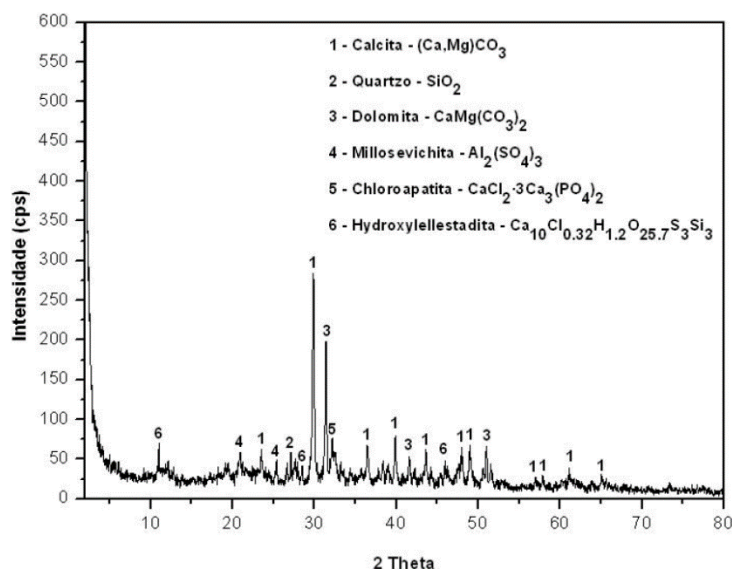


Figura 4: Difratoograma do lodo industrial.

Tabela 4: Propriedades físicas e análise química do lodo.

ÓXIDOS %	LODO INDUSTRIAL
CaO	16,59
Al ₂ O ₃	15,14
MgO	15,07
SiO ₂	5,31
SO ₃	4,70
P ₂ O ₅	0,43
Fe ₂ O ₃	0,14
K ₂ O	0,09
Outros	0,10
Perda ao Fogo (%)	42,43
Massa Específica Real (g/cm ³)	2,04
Índice de Atividade Pozzolânica (%)	71
Teor de Matéria Orgânica (%)	17,41
Limite de Liquidez (%)	59
Limite de Plasticidade (%)	Não Plástico

Com os resultados dos ensaios de lixiviação e solubilização o lodo ficou enquadrado como um resíduo de classe II – A (Resíduo não perigoso e não inerte). Embora todos os parâmetros do lixiviado não tenham

ultrapassado os limites máximos permitidos em norma, alguns solubilizados se apresentaram em concentração elevada enquadrando o material nesta categoria.

3.2 Propriedades do concreto no estado fresco

O comportamento plástico dos concretos produzidos com e sem resíduo pode ser visualizado na Tabela 5. Analisando-a é possível observar que todos os concretos apresentaram abatimento superior ao do concreto referência, sendo o teor de 5% o de maior valor para esse parâmetro, resultando em um aumento de 33%. Entretanto, com o aumento no teor de incorporação, e tomando por base a mistura A5L, há uma redução gradual dessa medida, indicando que pequenas quantidades são mais indicadas no quesito trabalhabilidade. É importante ressaltar ainda que essa redução no abatimento dos concretos produzidos com teores de 10, 15 e 20%, em relação a mistura com 5% de resíduo, não foi capaz de atingir o valor obtido para o concreto referência.

Tabela 5: Valores de abatimento para os concretos produzidos

MISTURA	TRABALHABILIDADE	
	SLUMP (MM)	DESVIO PARA O CONTROLE
REF0L	165,0	
A5L	220,0	+ 33,3%
A10L	195,0	+ 18,2%
A15L	180,0	+ 9,1%
A20L	170,0	+ 3,0%

Uma hipótese é a de que tal comportamento está relacionado à natureza do resíduo, proveniente do tratamento de efluentes resultantes da lavagem de tanques utilizados na fabricação de produtos de limpeza. Esses produtos tem na sua composição os surfactantes, substâncias também presentes em aditivos incorporadores de ar utilizados para aumentar a trabalhabilidade de concretos e argamassas com reduzidas relações água/cimento. Em baixas quantidades, esses aditivos são capazes de adsorver bolhas de ar à massa e reduzir a tensão superficial da água, diminuindo o atrito entre as partículas e aumentando a plasticidade da mistura [42].

Embora não tenham sido realizados ensaios de absorção, durante o processo de secagem do resíduo foi possível verificar uma grande retenção de água, o que sugere um alto potencial de absorção. Logo essa característica pode ter contribuído para menores incrementos de abatimento nas misturas A10L, A15L e A20L. Wong *et al.* [32] verificaram uma redução na trabalhabilidade de concretos produzidos com lodo de papel em função da alta porosidade e teor de cal livre desse material. Ademais, um aumento da porcentagem de resíduo contribui para uma redução na relação água/materiais secos, uma vez que o lodo é acrescentado aos materiais constituintes ao invés de ser utilizado em substituição parcial a algum destes.

Observações para a perda de trabalhabilidade com o aumento no teor de incorporação de resíduos na forma de lodo foram feitas por VARDHAN, SIDDIQUE e GOYAL [25], MASHALY, SHALABY e RASHWAN [26] e VASHISTHA *et al.* [24], onde a maior parte das causas está relacionada com o alto teor de finos e absorção de água, elevada área superficial e presença de partículas angulares.

Segundo MATHYE, IKOTUN e FANOURAKIS [22] a incorporação de um material com alta absorção de água e maior área superficial dos sólidos é a causa da diminuição na trabalhabilidade de misturas de concreto com lodo de ETE. XI *et al.* [23] precisaram aumentar a quantidade de aditivo superplastificante para manter a mesma trabalhabilidade de argamassas produzidas com lodo de mármore. No concreto esse parâmetro depende da granulometria e formato dos grãos de agregado [25]. Comparativamente aos agregados o lodo possui maior quantidade de finos o que incrementa a área superficial e demanda maior quantidade de água para molhagem.

3.2 Propriedades do concreto no estado endurecido

3.2.1 Resistência à compressão

Na Figura 5 são apresentados os resultados dos ensaios de resistência à compressão e desvio padrão para os corpos de prova com e sem resíduo, realizados em diversas idades. A análise desses resultados de-

monstra que o concreto referência apresentou uma resistência aos 28 dias de 22,8 MPa, superior à resistência de dosagem (20 MPa). Além disso, para todas as idades os concretos com resíduo apresentaram valores de resistência inferiores, o que indica que a adição do lodo atuou de forma negativa para esta propriedade. Aos 28 dias as misturas A5L, A10L, A15L e A20L apresentaram, respectivamente, uma redução de 40,4, 41,9, 38,2 e 38,7%.

Com a incorporação do lodo ocorre uma diminuição no teor de compostos cimentícios presentes no clínquer como o C_3S e C_2S , esse fator somado ao pequeno ou nulo poder aglomerante do resíduo contribuem para a redução da resistência mecânica do compósito. Progressivamente, o desempenho torna-se mais dependente das características do lodo que não possui capacidade cimentante [20]. O aumento da porosidade nos concretos, em decorrência da atuação do resíduo como uma substância surfactante também pode interferir tanto na resistência mecânica como na durabilidade das estruturas, reduzindo sua resistência a agentes agressivos que atuam em ações deletérias como na corrosão das armaduras.

Aos três dias, o concreto com 5% de lodo apresentou uma redução de cerca de 38% em sua resistência quando comparado ao concreto sem resíduo. Essa tendência de queda também ocorre para os traços com 10% de resíduo, sendo modificada a partir do teor de 15% quando o parâmetro começa a aumentar e atinge seu valor máximo dentre os traços com resíduo. Esse comportamento se dá de forma semelhante para os corpos de prova analisados aos sete dias. Já aos 28 dias, o concreto com 20% de incorporação apresenta uma leve redução em sua resistência, comparado ao traço com 15%. Em relação ao traço padrão a redução é de cerca de 39%.

A incorporação de resíduos de sedimentação, pode proporcionar tanto um ganho de resistência, como redução, o resultado positivo é encontrado para situações onde o resíduo consegue refinar a estrutura de poros da mistura ou melhorar o empacotamento da zona de transição [25], zona esta que continua a ser o ponto fraco do compósito, como nos concretos convencionais. Negativamente, a incorporação pode reduzir a formação dos compostos cimentantes ou ainda configurar pontos de fraqueza da zona de transição.

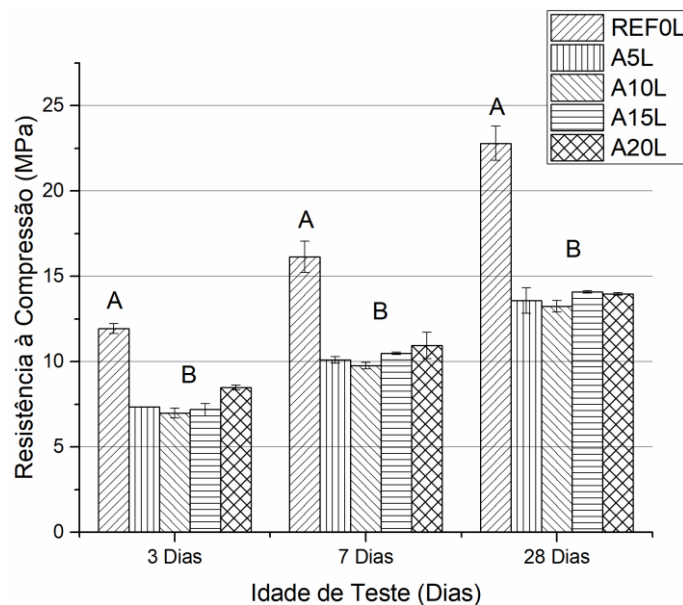


Figura 5: Resistência à compressão dos concretos nas idades de 3, 7 e 28 dias.

Apesar de leves diferenças nos comportamentos dos concretos desta pesquisa produzidos com diferentes teores de resíduo, uma análise estatística aplicando as metodologias de teste de hipóteses de Tukey demonstrou que há uma significativa diferença entre o concreto referência (Grupo A) e os demais (Grupo B). Porém, os concretos com resíduo podem ser considerados estatisticamente semelhantes, o que torna o concreto com 20% a melhor opção uma vez que, incorpora maiores quantidades de resíduo. Entretanto, comportamentos distintos foram reportados por FERNANDEZ *et al.* [75], XI *et al.* e CAPPELLESSO *et al.* [34] onde a resistência à compressão de concretos contendo lodo de ETA, mármore e de papel, respectivamente, diminuiu com o aumento no teor de lodo. Já VASHISTHA *et al.* [24] concluíram que para a substituição de agregados miúdos por lodo de indústria de papel em teores de até 30%, concretos e argamassas mantêm o desempenho do material convencional. MASHALY, SHALABY e RASHWAN [26] também encontraram 20%

como o teor ótimo para a incorporação de lodo de granito em concretos.

É possível constatar que o concreto referência apresentou um incremento de resistência à compressão dos 3 aos 7 dias de cerca de 35% e dos 7 aos 28 dias de, aproximadamente, 41%. Os traços com resíduo também apresentaram evoluções decorrentes das reações de hidratação ao longo das idades, entretanto menores do que o referência. O traço com 20% de lodo, por exemplo, obteve um aumento de resistência dos 3 aos 7 dias de cerca de 29%, e dos 7 aos 28 dias em torno de 28%. Isso pode demonstrar uma ausência ou valor muito baixo de atividade pozolânica do resíduo nos concretos, além disso, os elementos presentes no lodo, como o alumínio e enxofre, podem ter influenciado na formação dos compostos hidratados do concreto, reduzindo a resistência e seu incremento ao longo das idades para todos os traços em que foi utilizado.

Com esses valores de resistência à compressão pode-se utilizar os concretos estudados na pesquisa para a fabricação de peças de caráter não estrutural, como placas ou blocos de concreto para alvenarias de vedação, meio fios, intertravados, sarjetas, dentre outros.

3.2.2 Absorção de água

Os valores de absorção de água para os traços estudados são apresentados na Figura 6. Com a análise do gráfico é possível constatar que todos os traços confeccionados com resíduo apresentaram valores superiores ao concreto de referência.

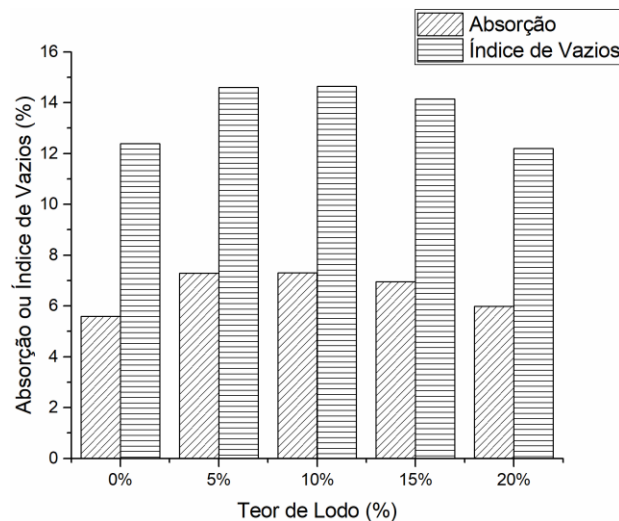


Figura 6: Taxa de absorção de água e índice de vazios dos concretos produzidos.

O concreto com 5% de resíduo foi o que obteve o maior valor, com um aumento de cerca de 31% para a absorção quando comparado com o traço padrão. Este comportamento pode ser explicado por se tratar da mistura que obteve maior plasticidade, em função da ação do resíduo, o que indica uma maior taxa de incorporação de ar na massa e consequente aumento da porosidade. Além disso, o lodo pode alterar a formação dos compostos hidratados do concreto, gerando uma microestrutura mais porosa e consequentemente maior absorção. FERNANDEZ *et al.* [75] também obtiveram um aumento na absorção e índice de vazios dos concretos com lodo de ETA.

Por outro lado, a adição de partículas finas pode proporcionar um refinamento dos poros em consequência do efeito fíler bem como um preenchimento de descontinuidades na granulometria do agregado miúdo o que reduz a taxa de absorção de concretos para grandes teores de adição [23]. A absorção por parte do resíduo também reduz a taxa de água livre na mistura [28]. Esses dois fatores poderiam explicar a tendência decrescente na absorção de água para as demais misturas.

O concreto com 20% de adição obteve valores de absorção e índice de vazios praticamente iguais ao concreto referência, embora sua resistência aos 28 dias tenha sido 38,7% inferior. Isso indica que não obstante o resíduo tenha sido capaz de preencher os poros do concreto, constitui um ponto de fraqueza na estrutura, contribuindo para a redução na resistência do compósito. Também é importante pontuar que concretos de alta qualidade tem valores de absorção inferiores a 10% [76], condição obtida em todas as misturas estudadas.

3.2.3 Análise microestrutural

Uma análise por MEV foi utilizada para correlacionar as propriedades encontradas com a microestrutura dos concretos. Nas Figuras 7(a) e 7(b) estão ilustradas, respectivamente, uma visão geral da microestrutura dos concretos padrão e com 20% de resíduo, onde pôde-se distinguir a pasta de cimento e os agregados e constatar uma semelhança na morfologia desses dois concretos. Já se tratando da microestrutura da zona de transição, ilustradas nas Figuras 7(c) e 7(d), é possível constatar que a amostra com resíduo apresenta uma zona visualmente mais heterogênea, porosa e com maior presença do composto hidratado etringita. Caso reflita uma tendência em toda a amostra, tem relação direta com os baixos valores de resistência à compressão encontrados para o concreto com resíduo.

A adição do resíduo pode promover um efeito de diluição de compostos oriundo da hidratação do cimento como o silicato de cálcio hidratado (CSH), principal responsável pela resistência do material [28]. Vale ressaltar que as fases foram identificadas apenas através da visualização topográfica, uma vez que não foi realizada análise complementar por energia dispersiva (EDS) para confirmação.

A presença de etringita na zona de transição para o concreto com resíduo pode estar ligada à maiores quantidades de íons residuais de aluminato e sulfato, advindos de elementos do lodo, e que são fundamentais na reação de formação deste composto hidratado. Situação semelhante foi observada por ALEXANDRE e LUZ [77] na incorporação de lodo do tratamento de água com elevados teores de alumina em pastas de cimento.

Para concretos fabricados com cimento CP V ARI RS, ou seja, de alta resistência inicial e resistente a sulfatos, os teores de C_3A , são limitados a 5% o que impede uma renovação de hidratação desse composto nas primeiras idades e garante a formação de etringita como produto estável e final dessas reações. Com isso, dado o possível aumento nas reservas de aluminato e sulfato esse composto é produzido em maior quantidade e não se converte em monossulfato como ocorre com a utilização de cimentos convencionais [78].

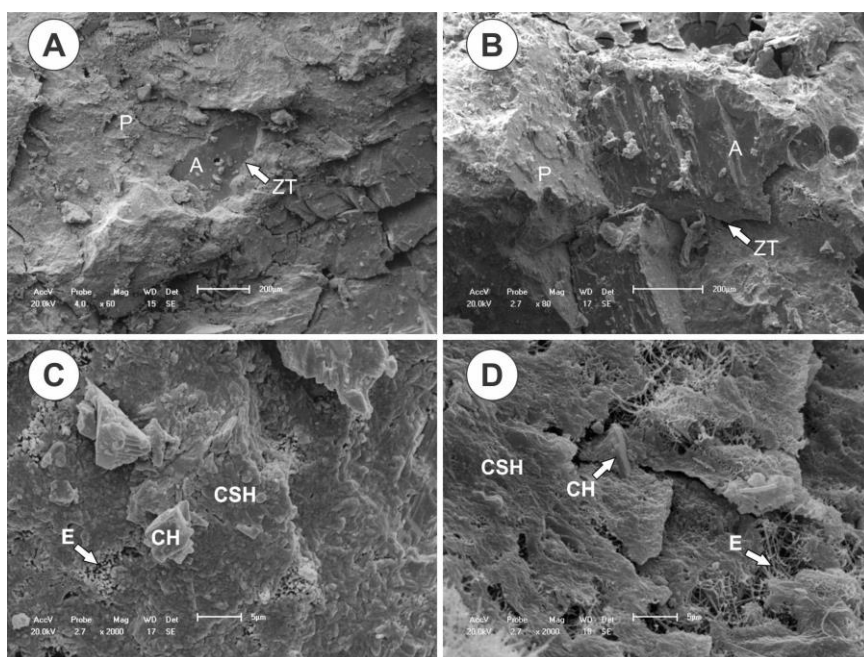


Figura 7: Microestrutura dos concretos produzidos: a) visão geral do concreto referência; b) visão geral do concreto com lodo; c) microestrutura do concreto referência; d) microestrutura do concreto com lodo. A – Agregado, P – Pasta, ZT – Zona de Transição, C-S-H – Silicato de Cálcio Hidratado, C-H – Hidróxido de Cálcio, E – Etringita.

3.2.4 Análise de durabilidade

Quanto à durabilidade dos concretos, estudada através do ensaio de penetração de íons cloreto, pode-se verificar (Figura 8) que nas primeiras idades, 7 e 28 dias, a mistura com 20% de resíduo apresentou uma maior frente de penetração quando comparada ao traço padrão. Para essas idades, respectivamente, os incrementos nas médias foram de 35,93% e 34,13%. Entretanto, aos 60 dias essa diferença foi reduzida para 8,46%.

Assim, pode-se inferir que em pequenas idades os concretos contendo resíduos possuem uma baixa durabilidade, entretanto, com o avanço das reações de hidratação essa característica tende a melhorar, prova-

velmente, em função de um preenchimento dos poros na matriz. Os resultados estão em concordância com os testes de resistência, uma vez que concretos menos resistentes geralmente estão associados a uma menor durabilidade frente à penetração de agentes deletérios.

Em alguns casos como na incorporação de lodo de papel, a considerável atividade pozolânica do material proporciona um refinamento da microestrutura e permite que os concretos com resíduo obtenham maiores resistências à penetração dos íons cloreto [79], comportamento não constatado nos concretos com lodo de produtos de limpeza. Materiais suplementares contendo alumínio em sua composição também podem ser capazes de adsorver os íons de cloreto para formais sais, reduzindo a quantidade de íons livres na estrutura de poros e consequentemente a taxa de penetração desse agente em concretos [80].

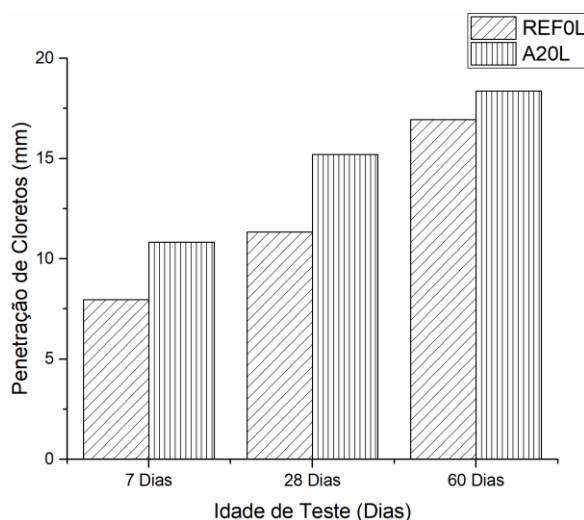


Figura 8: Profundidade de penetração de íons cloreto.

4. CONCLUSÕES

Os resultados revelaram que a presença do resíduo na composição dos concretos promoveu alterações tanto no estado fresco quanto endurecido, sendo mais evidente nos parâmetros de trabalhabilidade e resistência à compressão.

Para todos os traços de concreto com incorporação do resíduo houve um incremento de trabalhabilidade possivelmente atrelado à presença de surfactantes na composição desse material. Também foi constatada uma redução na resistência à compressão, em relação ao traço padrão, podendo alterações na microestrutura do compósito estarem ligadas a esse comportamento. A perda de resistência, entretanto, pode ser mitigada com uma redução na relação água/cimento das misturas.

Em todas as amostras com resíduo constatou-se uma redução no incremento de resistência dos 7 aos 28 dias quando comparado com o traço de referência, o que reforça a ideia de que o resíduo não apresenta atividade pozolânica considerável. A incorporação do lodo industrial promoveu um aumento na porosidade das amostras que pode ser atribuído a uma maior taxa de incorporação de ar na massa resultante do efeito da adição. Foi verificado um aumento na profundidade de penetração de íons cloreto nos concretos com lodo em todas as idades. De um modo geral, tomando por base os resultados técnicos, os concretos com 20% de resíduo são considerados a melhor opção para reaproveitamento desse material em matrizes cimentícias.

5. AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (Capes) e às Indústrias Becker pelo apoio financeiro e de material para realização desta pesquisa.

6. BIBLIOGRAFIA

- [1] DAS, S., LEE, S.H., KUMAR, P., *et al.*, “Solid waste management: Scope and the challenge of sustainability”, *Journal of Cleaner Production*, v. 228, pp. 658-678, 2019.
- [2] MINELGAITĖ, A., LIODIKIENĖ, G., “Waste problem in European Union and its influence on waste management behaviors”, *Science of The Total Environment*, v. 667, pp. 86-93, 2019.

- [3] GUAN, Y., HUANG, G., LIU, L., *et al.*, “Ecological network analysis for an industrial solid waste metabolism system”, *Environmental Pollution*, v. 244, pp. 279-287, 2019.
- [4] CAI, W., LIU, C., ZHANG, C., *et al.*, “Developing the ecological compensation criterion of industrial solid waste based on energy for sustainable development”, *Energy*, v. 157, pp. 940-948, 2018.
- [5] BRASIL. Política nacional de resíduos sólidos. Lei n.º 12.305/2010, de 2 de agosto. Brasília, 2010.
- [6] SALESA, A., BENEDICTO, J.A.P., ARANGUREN, D.C., *et al.*, “Physico-mechanical properties of multi-recycled concrete from precast concrete industry”, *Journal of Cleaner Production*, v. 141, pp. 248-255, 2015.
- [7] VISHWAKARMA, V., RAMACHANDRAN, D., “Green concrete mix using solid waste and nanoparticles as alternatives—a review”, *Construction and Building Materials*, v. 162, pp. 96-103, 2018.
- [8] ALIABDO, A.A., ABD ELMOATY, M.A., AUDA, E.M., “Re-use of waste marble dust in the production of cement and concrete”, *Construction and Building Materials*, v. 50, pp. 28-41, 2014.
- [9] ANDREW, R.M., “Global CO₂ emissions from cement production”, *Earth System Science Data*, v. 10, n. 1, pp. 195, 2018.
- [10] GONZÁLEZ-KUNZ, R.N., PINEDA, P., BRAS, A., *et al.*, “Plant biomass ashes in cement-based building materials. Feasibility as eco-efficient structural mortars and grouts”, *Sustainable Cities and Society*, v. 31, pp. 151-172, 2017.
- [11] IBRAHIM, H.A., GOH, Y., NG, Z.A., “Hydraulic and strength characteristics of pervious concrete containing a high volume of construction and demolition waste as aggregates”, *Construction and Building Materials*, v. 253, 119251, 2020.
- [12] SANTOS, A.G., FERRARI, A.K., “Influência do resíduo de PVC como agregado no concreto para peças de pavimentos intertravados”, *Ambiente Construído*, v. 19, n. 3, pp. 39-51, 2019.
- [13] SILVA, B.C.L., GACHET, L.A., LINTZ, R.C.C., “Análise microscópica de concreto pigmentado com resíduos de borracha aplicado em piso intertravado” *Matéria*, v. 25, n.4, 2020.
- [14] DIAS, A.R.O., AMANCIO, F.A., SOUSA, I.L.X., *et al.*, “Efeitos da substituição do cimento Portland por escória de aciaria BSSF nas propriedades físicas e mecânicas do concreto”, *Matéria*, v. 25, n. 4, 2020.
- [15] MENG, Y., LING, T.C., MO, K.H., “Recycling of wastes for value-added applications in concrete blocks: An overview”, *Resources, Conservation and Recycling*, v. 138, pp. 298-312, 2018.
- [16] PARIS, J.M., ROESSLER, J.G., FERRARO, C.C., *et al.*, “A review of waste products utilized as supplements to Portland cement in concrete”, *Journal of Cleaner Production*, v. 121, pp. 1-18, 2016.
- [17] JUENGER, M.C.G., SIDDIQUE, R., “Recent advances in understanding the role of supplementary cementitious materials in concrete”, *Cement and Concrete Research*, v. 78, pp. 71-80, 2015.
- [18] QI, Y., YUE, Q., HAN, S., *et al.*, “Preparation and mechanism of ultra-lightweight ceramics produced from sewage sludge”, *Journal of Hazardous Materials*, v. 176, pp. 76-84, 2010.
- [19] GOMES, S.D.C., ZHOU, J.L., LI, W., *et al.*, “Progress in manufacture and properties of construction materials incorporating water treatment sludge: A review”, *Resources, Conservation and Recycling*, v. 145, pp. 148-159, 2019.
- [20] ANDRADE, J.J.O., WENZEL, M.C., DA ROCHA, G.H., *et al.*, “Performance of rendering mortars containing sludge from water treatment plants as fine recycled aggregate”, *Journal of Cleaner Production*, v. 192, pp. 159-168, 2018.
- [21] LYNN, C.J., DHIR, R.K., GHATAORA, G.S., *et al.*, “Sewage sludge ash characteristics and potential for use in concrete”, *Construction and Building Materials*, v. 98, pp. 767-779, 2015.
- [22] MATHYE, R.P., IKOTUN, B.D., FANOURAKIS, G.C., “The effect of dry wastewater sludge as sand replacement on concrete strengths”, *Materials Today: Proceedings*, In Press.
- [23] XI, Y., ANASTASIOU, E., KAROZOU, A., *et al.*, “Fresh and hardened properties of cement mortars using marble sludge fines and cement sludge fines”, *Construction and Building Materials*, v. 220, pp. 142-148, 2019.
- [24] VASHISTHA, P., KUMAR, V., SINGH, S.K., *et al.*, “Valorization of paper mill lime sludge via application in building construction materials: A review”. *Construction and Building Materials*, v. 211, pp. 371-382, 2019.

- [25] VARDHAN, K., SIDDIQUE, R., GOYAL, S., “Strength, permeation and micro-structural characteristics of concrete incorporating waste marble”, *Construction and Building Materials*, v. 203, pp. 45-55, 2019.
- [26] MASHALY, A.O., SHALABY, B.N., RASHWAN, M.A., “Performance of mortar and concrete incorporating granite sludge as cement replacement”, *Construction and Building Materials*, v. 169, pp. 800-818, 2018.
- [27] KAISH, A.B.M.A., BREESEM, K.M., ABOOD, M.M., “Influence of pre-treated alum sludge on properties of high-strength self-compacting concrete”, *Journal of Cleaner Production*, v. 202, pp. 1085-1096, 2018.
- [28] MASHALY, A.O., EL-KALIOUBY, B.A., SHALABY, B.N., *et al.*, “Effects of marble sludge incorporation on the properties of cement composites and concrete paving blocks”, *Journal of Cleaner Production*, v. 112, pp. 731-741, 2016.
- [29] ROSLAN, N.H., ISMAIL, M., MAJID, Z.A., *et al.*, “Performance of steel slag and steel sludge in concrete”, *Construction and Building Materials*, v. 104, pp. 16–24, 2016.
- [30] SOGANCIOGLU, M., YEL, E., AKSOY, S., *et al.*, “Enhancement of concrete properties by waste physicochemical treatment sludge of travertine processing wastewater”, *Journal of Cleaner Production*, v. 112, pp. 575-580, 2016.
- [31] ZHAN, B.J., POON, C.S., “Study on feasibility of reutilizing textile effluent sludge for producing concrete blocks”, *Journal of Cleaner Production*, v. 101, pp. 174-179, 2015.
- [32] WONG, H.S., BARAKAT, R., ALHILALI, A., *et al.*, “Hydrophobic concrete using waste paper sludge ash”, *Cement and Concrete Research*, v. 70, pp. 9–20, 2015.
- [33] PERA, J., AMROUZ, A., “Development of Highly Reactive Metakaolin from Paper Sludge”, *Advanced Cement Based Materials*, v. 7, pp. 49-56, 1998.
- [34] CAPPELLESSO, V.G., PETRY, N.S., MALACARNE, C.S., *et al.*, “Potencial de uso de um resíduo de lodo de efluentes de indústrias de papel em matrizes cimentícias”, *Matéria*, v. 25, n. 1, 2020.
- [35] KAYA, Y., BARLAS, H., ARAYICI, S., “Nanofiltration of Cleaning-in-Place (CIP) wastewater in a detergent plant: Effects of pH, temperature and transmembrane pressure on flux behavior”, *Separation and Purification Technology*, v. 65, pp. 117–129, 2009.
- [36] JANGKORN, S., KUHAKAEW, S., THEANTANOO, S., *et al.*, “Evaluation of reusing alum sludge for the coagulation of industrial wastewater containing mixed anionic surfactants”, *Journal of Environmental Sciences*, v. 23, pp. 587–594, 2010.
- [37] LINCLAU, E., CEULEMANS, J., SITTER, K., *et al.*, “Water and detergent recovery from rinsing water in an industrial environment”, *Water Resources and Industry*, v. 14, pp. 3–10, 2016.
- [38] PEDRAZZANI, R., CERETTI, E., ZERBINI, I., *et al.*, “Biodegradability, toxicity and mutagenicity of detergents: Integrated experimental evaluations”, *Ecotoxicology and Environmental Safety*, v. 84, pp. 274–281, 2012.
- [39] EDSER, C., “Structured surfactants: An appreciation”, *Focus on Surfactants*, v. 2006, pp. 1-2, 2006.
- [40] PALMER, M., HATLEY, H., “The role of surfactants in wastewater treatment: Impact, removal and future techniques: A critical review”, *Water research*, v. 147, pp. 60-72, 2018.
- [41] ALOUI, F., KCHAOU, S., SAYADI, S., “Physicochemical treatments of anionic surfactants wastewater: Effect on aerobic biodegradability”, *Journal of Hazardous Materials*, v. 164, pp. 353–359, 2009.
- [42] QIAO, M., CHEN, J., YU, C., WU, S., GAO, N., RAN, Q., “Gemini surfactants as novel air entraining agents for concrete”, *Cement and Concrete Research*, v. 100, pp. 40-46, 2017.
- [43] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 10007: Amostragem de resíduos sólidos. Rio de Janeiro, 2004.
- [44] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR NM 248: Agregados – Determinação da composição granulométrica. Rio de Janeiro, 2003.
- [45] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR NM 52: Agregado miúdo – Determinação da massa específica e massa específica aparente. Rio de Janeiro, 2009.
- [46] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 6459: Solo – Determinação do limite de liquidez. Rio de Janeiro, 1984.

- [47] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 7180: Solo – Determinação do limite de plasticidade. Rio de Janeiro, 1984.
- [48] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 5751: Materiais pozolânicos – Determinação da atividade pozolânica com cal aos sete dias. Rio de Janeiro, 2012.
- [49] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 5752: Materiais pozolânicos – Determinação do índice de desempenho com cimento Portland aos 28 dias. Rio de Janeiro, 2014.
- [50] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 11579: Cimento Portland – Determinação do índice de finura por meio da peneira 75 μm (nº 200). Rio de Janeiro, 2012.
- [51] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR NM 65: Cimento Portland – Determinação do tempo de pega. Rio de Janeiro, 2003.
- [52] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 11582: Cimento Portland – Determinação da expansibilidade Le Chatelier. Rio de Janeiro, 2012.
- [53] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 7215: Cimento Portland – Determinação da resistência à compressão. Rio de Janeiro, 1997.
- [54] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR NM 23: Cimento portland e outros materiais em pó – Determinação da massa específica. Rio de Janeiro, 2001.
- [55] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 16697: Cimento Portland – Requisitos. Rio de Janeiro, 2018.
- [56] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR NM 53: Agregado graúdo – Determinação da massa específica, massa específica aparente e absorção de água. Rio de Janeiro, 2009.
- [57] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR NM 45: Agregados – Determinação da massa unitária e do volume de vazios. Rio de Janeiro, 2006.
- [58] LIMA, J.F., INGUNZA, M.P.D., “Effects of Sewage Sludge Ashes Addition in Portland Cement Concretes”, in: Proceedings of the 2nd International Conference on Civil, Materials and Environmental Sciences, Atlantis Press, pp. 189-191, 2015.
- [59] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 5738: Concreto – Procedimento para moldagem e cura de corpos de prova. Rio de Janeiro, 2015.
- [60] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR NM 67: Concreto: Determinação da consistência pelo abatimento do tronco de cone. Rio de Janeiro, 1998.
- [61] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 5739: Concreto: Ensaio de compressão de corpos-de-prova cilíndricos. Rio de Janeiro, 2007.
- [62] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 9778: Argamassa e concreto endurecidos: Determinação da absorção de água, índice de vazios e massa específica. Rio de Janeiro, 2009.
- [63] TIWARI, P., CHANDAK, R., YADAV, R. K., “Effect of Salt Water on Compressive Strength of Concrete”, *International Journal of Engineering Research and Applications*, v. 4, pp. 38-42, 2014.
- [64] NORDTEST METHOD, NT BUILD 443 – Concrete, hardened: accelerated chloride penetration, Oslo, Norway, 1995.
- [65] OTSUKI, N., NAGATAKI, S., NAKASHITA, K., “Evaluation of the AgNO_3 solution spray method for measurement of chloride penetration into hardened cementitious matrix materials”, *Construction and Building Materials*, v. 7, n. 4, pp. 195-201, 1993.
- [66] KIM, M.Y., YANG, E.I., YI, S.T., “Application of the colorimetric method to chloride diffusion evaluation in concrete structures”, *Construction and Building Materials*, v. 41, pp. 239-245, 2013.
- [67] REAL, L. V. *et al.*, “Método colorimétrico por aspersão de nitrato de prata para avaliação da penetração de cloretos em concreto: estado da arte”, *Revista ALCONPAT*, v. 2, pp. 149-159, 2015.
- [68] MEDEIROS, A.G., “Propriedades de Concreto Sustentável Produzido com Pó do Polimento do Porcelanato e Resíduo da Scheelita”, Tese de Dr., UFERSA, Mossoró, RN, Brasil, 2019.
- [69] SILVA, L.A., NAHIME, B.O., FELIPE, A.S., *et al.*, “Performance of cementitious matrices incorporating concrete floor polishing sludge waste”, *Construction and Building Materials*, v. 265, 120119, 2020.
- [70] GONÇALVES, J.P., “Utilização do resíduo de corte de granito (RCG) como adição para produção de concretos”, Dissertação de Me., UFRGS, Porto Alegre, RS, Brasil, 2000.

- [71] KRISHNAN, S., BISHNOI, S., “Understanding the hydration of dolomite in cementitious systems with reactive aluminosilicates such as calcined clay”, *Cement and Concrete Research*, v. 108, pp. 116–128, 2018.
- [72] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 12653: Materiais pozolânicos – Requisitos. Rio de Janeiro, 2014.
- [73] SCRIVENER, K., SNELLINGS, R., LOTHENBACH, B., *A Practical Guide to Microstructural Analysis of Cementitious Materials*, New York, CRC Press, 2016.
- [74] KNAPEN, E., GEMERT, D.V., “Cement hydration and microstructure formation in the presence of water-soluble polymers”, *Cement and Concrete Research*, v. 39, pp. 6–13, 2009.
- [75] FERNANDEZ, L.P., MIKOWSKI, P.C.B., MACIOSKI, G., *et al.*, “Avaliação da incorporação do lodo de Estação de Tratamento de Água em peças de concreto intertravado”, *Matéria*, v. 23, n. 3, 2018.
- [76] GENCEL, O., OZEL, C. KOKSAL, F., *et al.*, “Properties of concrete paving blocks made with waste marble”, *Journal of Cleaner Production*, v. 21, pp. 62-70, 2012.
- [77] ALEXANDRE, E., LUZ, C.A., “Substituição parcial do cimento CPV-ARI por lodo de estação de tratamento de água (ETA)”, *Matéria*, v. 25, n. 1, 2020.
- [78] PUPPALA, A.J., GRIFFIN, J.A., HOYOS, L.R., “Studies on Sulfate-Resistant Cement Stabilization Methods to Address Sulfate-Induced Soil Heave”, *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, v. 130, pp. 391-402, 2004.
- [79] QUDOOS, A., JEON, I.K., KIM, S.S. *et al.*, “Utilization of Waste Polysilicon Sludge in Concrete” *Materials*, v. 13, n. 1, 2020.
- [80] MATOS, P.R., SAKATA, R.D., PRUDÊNCIO JR, L.R.P., “Eco-efficient low binder high-performance self-compacting concretes”, *Construction and Building Materials*, v. 225, pp. 941-955, 2019.

ORCID

José Daniel Jales Silva	https://orcid.org/0000-0002-8411-978
Maria Del Pilar Durante Ingunza	https://orcid.org/0000-0001-6994-7559
Paulo Alysson Brilhante Faheina de Souza	https://orcid.org/0000-0002-6775-8727
Liana Filgueira Albuquerque	https://orcid.org/0000-0001-9181-5392
Luiza Gabriela Galvão de Medeiros	https://orcid.org/0000-0002-5803-1884