

Estudo preliminar da resistência de concretos com diferentes teores de cinzas da incineração de resíduos sólidos perigosos

ALESSANDRA B. SOARES - MESTRANDA - <https://orcid.org/0009-0004-4932-3756> (soares.bastos87@aluno.ifce.edu);
LEANDRO W. S. BRITO - GRADUANDO; **GEMMELLE O. SANTOS** - PROF. DR. — IFCE; **ROBERTO A. C. DA SILVA** - TÊC. DE LABORATÓRIO — UFC

RESUMO

O OBJETIVO DA PESQUISA FOI ANALISAR PRELIMINARMENTE O EFEITO DA ADIÇÃO DAS CINZAS DA INCINERAÇÃO DE RESÍDUOS SÓLIDOS PERIGOSOS (CIRSP) SOBRE AS PROPRIEDADES FÍSICAS E MECÂNICAS DO CONCRETO DE CIMENTO PORTLAND (CCP). FORAM MOLDADOS, CURADOS EM ÁGUA E ENSAIADOS CORPOS DE PROVA DE REFERÊNCIA E COM DIFERENTES TEORES DE CIRSP (10%, 15% E 25%) EM SUBSTITUIÇÃO AO AGREGADO MIÚDO (AREIA). OS RESULTADOS PRELIMINARES MOSTRARAM QUE A INCORPORAÇÃO DAS CINZAS AO CONCRETO PERMITIU A PRODUÇÃO DE CORPOS DE PROVA COM RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO SUPERIOR A 20 MPa, EXCETO PARA OS QUE CONTINHAM 25% DE SUBSTITUIÇÃO. PARA ESSE PARÂMETRO, A SUBSTITUIÇÃO DE 10% FOI CONSIDERADA A MAIS ADEQUADA, SENDO QUE A LITERATURA NÃO APRESENTA CONSENSO QUANTO AO TEOR IDEAL, JÁ QUE AS CINZAS VARIAM EM TERMOS QUÍMICOS E FÍSICOS. ALÉM DISSO, FOI OBSERVADO QUE A ADIÇÃO DE 25% DE CINZAS PREJUDICOU A TRABALHABILIDADE DO CONCRETO, RESULTANDO EM DESAGREGAÇÃO E REDUÇÃO SIGNIFICATIVA DO TEMPO DE PEGA. ESSA PESQUISA, LOCALMENTE PIONEIRA, INICIA UMA IMPORTANTE LINHA DE INVESTIGAÇÃO PARA ENGENHARIA CIVIL E GESTÃO AMBIENTAL NO ESTADO DO CEARÁ, TENDO EM VISTA AS POSSIBILIDADES DE SE REDUZIR O CONSUMO DE AREIA (UM AGREGADO NATURAL CARO E PROVENIENTE DE ÁREAS CADA VEZ MAIS DISTANTES E LEGALMENTE PROTEGIDAS), BEM COMO REDUZIR A DISPOSIÇÃO FINAL DE CIRSP EM ATERRO SANITÁRIO.

PALAVRAS-CHAVE: RESÍDUOS PERIGOSOS, INCINERAÇÃO, CINZAS, CONCRETO.

1. INTRODUÇÃO

Uma parte dos resíduos gerados nas indústrias e nos serviços de saúde são

Classe I (perigosos) em razão de suas características de inflamabilidade, corrosividade, reatividade, toxicidade, patogenicidade, carcinogenicidade, teratogenicidade e mutagenicidade, e por apresentarem significativo risco à saúde pública ou à qualidade ambiental.

Os Resíduos Sólidos Perigosos (RSP) podem ser tratados através de diversas tecnologias: incineração, autoclave, micro-ondas e aterros industriais (que representam as alternativas mais caras), a blendagem e o coprocessamento em fornos de cimenteiras (que são formas de aproveitamento desses resíduos como insumos) e o

envio para aterros sanitários ou outras disposições sobre o solo (com diversos riscos ambientais e sociais).

Em várias partes do mundo, vem crescendo a tentativa de aumentar a valorização das cinzas provenientes da incineração de resíduos perigosos e reduzir seu envio aos aterros sanitários.

Em Fortaleza-CE, os geradores de RSP (independente do volume) são obrigados a assumir todos os custos pelos serviços de manejo, conforme a Lei Municipal 10.340/2015. Em geral, esses geradores enviam seus RSP para incineração no Centro de Tratamento de Resíduos Perigosos

TABELA 1

LISTA DE ANÁLISES, PARÂMETROS E ENSAIOS REALIZADOS

Ensaio ou procedimento	CIRSP	A	B	CP
Quarteamento	X	X	X	
Granulometria	X	X	X	
Determinação de umidade	X	X	X	
Módulo de finura e dimensão máxima	X	X	X	
Massa específica dos agregados miúdos	X	X		
Massa específica dos agregados graúdos			X	
Densidade real dos agregados miúdos	X	X		
Material pulverulento	X	X	X	
Massa unitária	X	X	X	
Moldagem/cura dos corpos de prova cilíndricos				X
Resistência à compressão				X
Ensaio de abatimento				X

CIRSP: CINZAS DA INCINERAÇÃO DE RESÍDUOS SÓLIDOS PERIGOSOS; A: AREIA; B: BRITA; CP: CORPO DE PROVA

FONTE: AUTORES (2024)



A



B

FIGURA 1

EXEMPLOS DOS CORPOS DE PROVA E DO ENSAIO DE ROMPIMENTO AOS 28 DIAS

FONTE: AUTORES (2024)

- CTRP, localizado no bairro Passaré, por meio de um contrato com uma transportadora devidamente licenciada.

A incineração resulta na geração de cinzas (que são enviadas para o Aterro Sanitário Metropolitano), gases (que são tratados antes de serem lançados na atmosfera), efluentes (que são tratados em estação interna) e calor (que é aproveitado no aquecimento da autoclave existente dentro do CTRP).

Em Fortaleza-CE, os estudos sobre as cinzas são recentes e essa pesquisa, a partir desse histórico, visa contribuir com o crescimento dos conhecimentos sobre esse tema à medida que realizou a caracterização física das cinzas e avaliou sua incorporação em concretos, substituindo a areia.

Considerando a tendência de crescimento na geração de CIRSP, a necessidade de se pesquisar as possibilidades de reaproveitamento e valorização desse resíduo, a importância de se reduzir sua destinação ao aterro sanitário e a busca por soluções inovadoras e sustentáveis na gestão dessa classe de resíduo, decidiu-se desenvolver essa pesquisa, cujo objetivo foi analisar o efeito da adição da CIRSP sobre as propriedades físicas e mecânicas do Concreto de Cimento Portland (CCP).

2. MATERIAIS E MÉTODOS

As cinzas estudadas foram provenientes da incineração de Resíduos Sólidos Perigosos - RSP realizada no Centro de Tratamento de Resíduos Perigosos (CTRP), localizado na Rua A, nº 725, Passaré, Fortaleza-CE. Atualmente, o equipamento incinera 10 toneladas de RSP por dia, sendo 98% de resíduos de serviços de saúde e 2% de resíduos industriais. Após a queima (1000 °C), sobra aproximadamente 10%, ou seja, 01 tonelada de cinza por dia, que é acondicionada em contêiner e depois enviada para aterro sanitário. Além da cinza, a pesquisa utilizou brita, areia grossa e Cimento Portland de Alto-forno Poty CPIII 32-RS. As amostras desses materiais foram

submetidas aos ensaios listados na Tabela 1.

Na pesquisa, o concreto foi preparado conforme o traço de referência definido pela Associação Brasileira de Cimento Portland (ABCP): 1:1,74:2,98:0,53 (cimento, areia, brita, fator água/cimento, em massa), com resistência característica à compressão de 20 MPa (classe de resistência C20 e classe de consistência S50; mínimo admissível para concreto estrutural), uso de misturador de argamassa acoplado em furadeira e baldes plásticos de 20 litros. Ao todo, foram moldados 04 corpos de prova de referência, realizada cura por imersão em água e rompimento em prensa de 300 toneladas após 28 dias (Figura 1).

Para analisar o efeito da adição da CIRSP nas propriedades físicas e mecânicas do concreto, realizou-se a substituição parcial da areia por teores crescentes de CIRSP passantes na peneira de 2 mm em novos traços de concreto com 10, 15 e 25% de substituição em massa (Tabela 2). Para cada mistura, foram moldados 04 corpos de prova (Tabela 3). A CIRSP, antes da utilização nas misturas, ficou dentro de uma bandeja metálica durante 48 horas exposta ao sol para redução da sua umidade natural, passou por catação manual (para retirada de materiais grosseiros como agulhas, vidros e outros materiais não queimados), foi britada por aproximadamente 40 minutos.

As curvas granulométricas da CIRSP (catada e britada) e da areia estão representadas na Figura 2 e detalhadas na Tabela 4. A granulometria das britas está representada na Figura 3. Foi observada uma granulometria diferente para os três materiais, sendo que apenas a cinza catada não

TABELA 2

DISTRIBUIÇÃO DOS INSUMOS NAS DOSAGENS ESTUDADAS

Materiais	Materiais	Referência	Misturas ensaiadas		
		A100/CIRSP 0	A90/CIRSP 10	A85/CIRSP 15	A75/CIRSP 25
Cimento			6,0		
Areia		12,0	10,8	10,2	9,0
Brita	Kg		12,0		
Água			3,3		
CIRSP		0,0	1,2	1,8	3,0

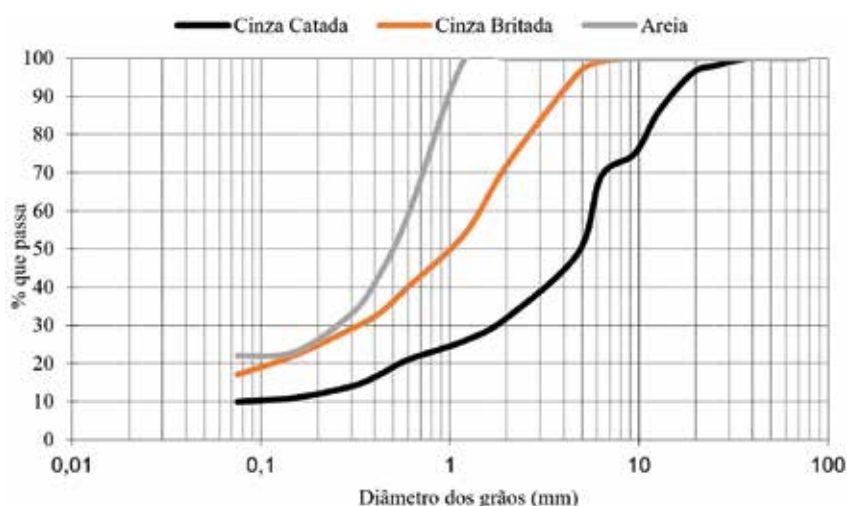
FONTE: AUTORES (2024)

TABELA 3

DESCRIBÇÃO DAS PREPARAÇÕES DO CONCRETO COM E SEM CIRSP

Traço	Composição	Frações (%)	Corpos de prova
Referência	Cimento, areia, brita, água	A100/CIRSP 0	4
1	Cimento, areia, CIRSP, brita, água	A90/CIRSP 10	4
2		A85/CIRSP 15	4
3		A75/ CIRSP 25	4
Total			16

A = AREIA; CIRSP: CINZAS DA INCINERAÇÃO DE RESÍDUOS SÓLIDOS PERIGOSOS
 FONTE: AUTORES (2024)

**FIGURA 2**

CURVA GRANULOMÉTRICA DOS AGREGADOS

FONTE: AUTORES (2024)

se encaixou dentro dos limites utilizáveis recomendados pela norma para agregado miúdo, não sendo utilizada nas misturas. A Tabela 4 mostra a composição granulométrica dos agregados e a Tabela 5 as demais características físicas.

Segundo Silva, Barroso e Cabral (2019), as areias exibem massas especí-

ficas superiores às das britas, sugerindo que os materiais constituintes dos agregados finos são mais densos em comparação com os agregados grossos.

TABELA 4

COMPOSIÇÃO GRANULOMÉTRICA DOS AGREGADOS MIÚDOS

Composição (%)	Cinza		Areia
	Catada	Britada	
Pedregulho	51	4	0
Areia grossa	17	24	0
Areia média	15	39	57
Areia fina	7	16	21
Silte/Argila	10	17	22

FONTE: AUTORES (2024)

Sobre as características das cinzas, apesar de influenciadas por sua origem, pelas características dos resíduos e pelo método de tratamento utilizado (MEMON; SHEIKH; PARACHA, 2013), obtiveram-se os resultados contidos na Tabela 6, comparativamente com a literatura.

As características físicas do agregado graúdo utilizado na pesquisa estão reunidas na Tabela 7 e 8.

Observou-se que a curva granulométrica da amostra de brita se encaixou dentro dos limites da zona granulométrica 9,5/25 recomendados pela norma.

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os resultados preliminares da resistência à compressão do concreto convencional e do concreto modificado (com teores diferentes de CIRSP) foram reunidos na Tabela 9 e plotados na Figura 4. Observou-se que a resistência à compressão de todos os corpos de prova (com e sem cinzas) superaram 20MPa, sendo este um resultado inovador da pesquisa e muito positivo, exceto para o CP₂ e CP₄ da mistura com 25% de cinzas (M25 destacado em verde).

Os resultados preliminares também permitiram outra observação: em geral, o aumento do teor de cinzas no CCP tendeu a diminuir a resistência à compressão. Considerando os valores médios, essa redução de resistência chegou a 17% em relação à dosagem de referência quando foram

TABELA 5

OUTRAS CARACTERÍSTICAS FÍSICAS DOS AGREGADOS MIÚDOS

Características	Cinza		Areia
	Catada	Britada	
Umidade (%)	9,62	6,69	5,40
Módulo de finura (mm)	6,97	5,75	2,48
Dimensão máxima (mm)	25,40	6,35	2,38
Massa unitária (g/cm ³)	—	1,00	1,32
Massa específica (g/cm ³)	—	2,50	2,53
Material pulverulento (%)	—	0,36	0,44
Densidade real	—	2,37	2,69

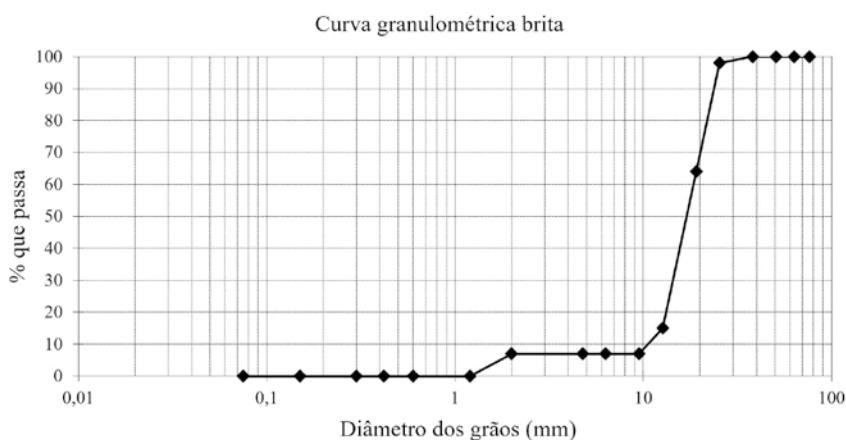
FONTE: AUTORES (2024)

TABELA 6

CARACTERÍSTICAS FÍSICAS DAS CINZAS NA LITERATURA E DADOS DESTA PESQUISA

Referências	MF (mm)	MU (g/cm ³)	ME (g/cm ³)	DR	MP (%)	DM (mm)	U
Dados desta pesquisa	5,75	1,00	2,5	2,37	0,36	6,35	6,69
Graupmann; Martins, 2019	2,75	2,36	—	—	—	—	—
Mendonça, 2018	2,50	0,46	2,03	—	—	—	—
Pinto, 2018	1,60	4,80	—	—	—	—	—
Sharma; Gupta; Singh, 2022	—	—	3,15	—	—	—	—
Moura, 2023	—	—	—	2,065 2,367	—	—	—
Alencar, 2022	—	—	—	1,76	—	—	—
Alam; Singh; Kumar, 2021	—	—	—	2,07	—	—	—

MF: MÓDULO DE FINURA; MU: MASSA UNITÁRIA; ME: MASSA ESPECÍFICA; DR: DENSIDADE REAL; MP: MATERIAL PULVERULENTO;
DM: DIMENSÃO MÁXIMA; U: UMIDADE
FONTE: AUTORES (2024)

**FIGURA 3**

CURVA GRANULOMÉTRICA DA BRITA UTILIZADA

FONTE: AUTORES (2024)

aplicados 10% de cinzas (M10 destacada em amarelo), 21% para a dosagem com 15% de cinzas (M15 destacada em vermelho) e até 29% para a dosagem com 25% de cinzas (M25 destacada em verde). A dosagem com menor variação nos resultados da resistência à compressão foi a M15 (desvio padrão 0,7) e maior foi a M25 (desvio padrão 3,8). A Figura 5 mostra o exato momento do rompimento dos corpos de prova com 10, 15 e 25% de cinzas, respectivamente.

Na literatura, as pesquisas sobre a substituição de cimento e areia por cinzas de resíduos incinerados têm revelado uma variedade de resultados em relação à resistência à compressão

e à durabilidade de concretos e argamassas, com autores identificando diferentes comportamentos em função do nível de substituição e do tipo de cinza. De forma geral, as análises indicam que, enquanto a incorporação de cinzas

TABELA 7

CLASSIFICAÇÃO DA BRITA

Brita	Dimensão (mm)	% Retido
0	4,8 - 9,5	7,90
1	9,5 - 19	52,4
2	19 - 25	35,9

FONTE: AUTORES (2024)

TABELA 8

CARACTERÍSTICAS FÍSICAS DA BRITA

Características	Brita
Módulo de finura (mm)	8,05
Dimensão máxima (mm)	25,40
Massa específica da brita (g/cm ³)	2,53
Massa unitária solta (g/cm ³)	1,46
Massa unitária compactada (g/cm ³)	1,61
Material pulverulento (%)	3,09

FONTE: AUTORES (2024)

pode trazer benefícios em determinados contextos, a sua dosagem deve ser controlada cuidadosamente para evitar a deterioração das propriedades mecânicas dos materiais.

Kaur, Siddique e Rajor (2019) identificaram um aumento da resistência com 10% de substituição de cinzas, mas uma diminuição significativa quando o nível de substituição foi elevado para 15%, evidenciando a necessidade de um equilíbrio adequado na dosagem de cinza para garantir o desempenho otimizado do concreto.

Katara, Samaiya e Murthy (2022) observaram que uma substituição de 7,5%

TABELA 9

RESULTADOS PRELIMINARES DA RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO DOS CONCRETOS ESTUDADOS

Dosagem	CP ₁	CP ₂	CP ₃	CP ₄	Média	Desvio
REF	30,1	28,4	29,2	28,9	29,2	0,7
M10	23,7	27,5	21,1	24,9	24,3	2,7
M15	24,0	22,7	23,2	22,4	23,1	0,7
M25	23,3	17,5	24,5	17,4	20,7	3,8

CP: CORPO DE PROVA; REF: REFERÊNCIA; M: MISTURA

FONTE: AUTORES (2024)

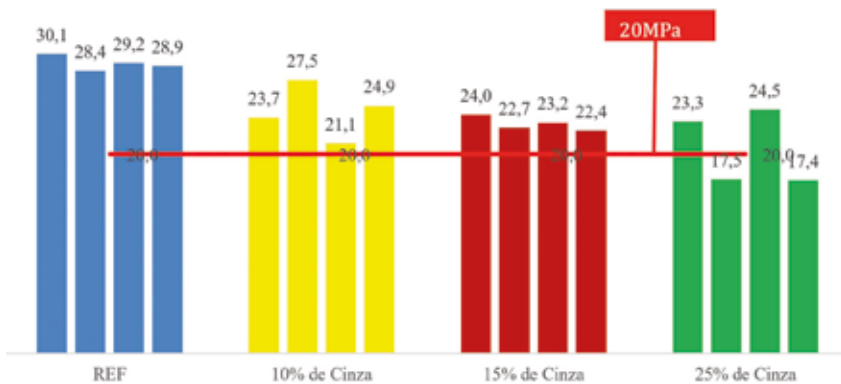


FIGURA 4

REPRESENTAÇÃO GRÁFICA DOS RESULTADOS PRELIMINARES DA RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO

FONTE: AUTORES (2024)

com cinzas de RSS não só aumentou a resistência à compressão do concreto em 20%, como também melhorou sua resistência à tração em 17% e à flexão em 14%, demonstrando que pequenas adições de cinzas podem ter efeitos positivos em misturas de concreto. Contudo, com níveis de substituição maiores

observaram um claro padrão de perda de resistência.

Maltaka (2023) observou corpos de prova de argamassa preparados com 20% de cinzas com resistência à compressão 67,1% maior, aos 28 dias, que os corpos de prova das amostras de controle.

Nesta pesquisa, preliminarmente, foi verificado que a trabalhabilidade do concreto também sofreu influência da presença da CIRSP. O concreto de referência baixou 1 cm, a mistura com 10% de cinzas teve 3 cm de abatimento, com 15% de cinzas (4 cm) e com 25% (7 cm). Os dois primeiros resultados foram classificados como positivos, ou seja, resultaram em um concreto com maior fluidez e trabalhabilidade, sem segregação, exsudação e perda de resistência (que são fatores que podem comprometer a integridade estrutural do concreto). Quando a substituição de areia pela cinza foi aumentada para 25%, o concreto apresentou desagregação significativa, reduzindo drasticamente a trabalhabilidade da mistura.

Wang; Song (2016) observaram baixos índices de fluidez em argamassa com 20% de cinzas e esse comportamento é consequência da alta quantidade de carbono não queimado presente nas cinzas e sua capacidade de adsorver e reter água, alterando a relação água/cimento.

Mare; Ouellet-Plamondon; Bhojaraju (2023) observaram o mesmo comportamento: quanto maior a quantidade



A 10% de CIRSP



B 15%



C 25%

FIGURA 5

DETALHES DOS ROMPIMENTOS DOS CORPOS DE PROVA

FONTE: AUTORA (2024)

substituída, menor o tempo de pega. Os autores atribuíram esse comportamento à natureza absorvente das cinzas e à menor quantidade de cimento nos sistemas mistos, bem como à presença de altos teores de álcalis (9%) nas cinzas, que aceleram a hidratação e reduzem o tempo de indução.

Manjunatha *et al.* (2023) também destacaram que o tempo de pega é significativamente influenciado pela adição de cinzas de RSS em função da composição química desse material. A presença de maiores quantidades de SiO₂ e Al₂O₃ tende a aumentar o tempo de pega das pastas, enquanto altos teores de álcalis aceleram o processo de endurecimento. Essas variações químicas afetam diretamente o comportamento da mistura, mostrando que o controle da composição das cinzas é crucial para determinar o tempo de pega ideal nas aplicações de cimento.

4. CONCLUSÕES

O estudo preliminar da incorporação das cinzas de resíduos perigosos ao concreto inaugurou uma importante

linha de investigação para engenharia civil e gestão ambiental no estado do Ceará, tendo em vista as possibilidades de se reduzir o consumo de areia, bem como o envio de cinzas ao aterro sanitário.

Os resultados preliminares permitiram concluir que a incorporação das cinzas ao concreto resultou em corpos de prova com resistência à compressão acima de 20MPa, sendo este resultado uma importante descoberta (exceto para o CP2 e CP4 que continham 25% de cinzas).

Foi possível concluir, preliminarmente, que o aumento do teor de cinzas no CCP tendeu a diminuir a resistência à compressão, sendo aparentemente mais adequado a substituição de até 10%. É importante destacar que não há unanimidade na literatura sobre o teor (%) ideal dessa substituição em função das diferenças entre as cinzas do ponto de vista químico e físico, do tipo de uso (*in natura* ou triturado) e da opção de emprego (com ou sem plastificante), entre outras variáveis.

Esse cenário aponta para o potencial de estudo nessa área.

Concluiu-se de forma inicial que o maior teor de cinzas (25%) influenciou negativamente na trabalhabilidade do concreto, com desagregação significativa e que o tempo de pega reduziu rapidamente.

Por fim, cabe destacar que este trabalho é parte de uma dissertação de mestrado em desenvolvimento e na próxima fase serão confeccionados novos traços para aprofundar as descobertas.

AGRADECIMENTOS

Esta pesquisa foi apoiada financeiramente pela Fundação Cearense de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (FUNCAP). Os autores também estendem seus agradecimentos ao Departamento de Engenharia Hidráulica e Ambiental da Universidade Federal do Ceará e ao Laboratório de Materiais de Construção do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Ceará. ©

▶ REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] ALAM, P.; SINGH, D.; KUMAR, S. Incinerated municipal solid waste bottom ash bricks: a sustainable and cost-efficient building material. *Materials Today: Proceedings*, v.49, p.1566-1572, part 5., 2022.
- [2] ALENCAR, V. L. de L. Caracterização geotécnica de solo estabilizado com cimento e cinzas de resíduos sólidos da saúde. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil), Centro de Tecnologia, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 90f., 2022.
- [3] GRAUPMANN et al. Análise da resistência à compressão de concretos com adição de cinza de aterro sanitário. *Revista Matéria*, v.24, n.02, e-12348, 11p., 2019.
- [4] KAUR, H.; SIDDIQUE, R.; RAJOR, Rajor. Influence of incinerated biomedical waste ash on the properties of concrete. *Construction and Building Materials*, v. 226, p. 428-441, 2019.
- [5] MANJUNATH et al. Exploring the potential use of incinerated biomedical waste ash as an eco-friendly solution in concrete composites: a review. *Construction and Building Materials*, v.387, n.17, jul., 2023.
- [6] MATAKKAH, F. Recycling of hazardous medical waste ash toward cleaner utilization in concrete mixtures. *Journal of Cleaner Production*. v.400, may., 2023.
- [7] MEMON, S. A.; SHEIKH, M. A.; PARACHA, M. B. Utilization of hospital waste ash in concrete. *Journal of Engineering and Technology*, v.32, n.1, 8p, jan., 2013.
- [8] MENDONÇA, F. L. de. Caracterização das cinzas de incineração de resíduos sólidos de serviços de saúde para inserção em ciclos produtivos e ambientais. Trabalho de Conclusão de Curso (Engenharia Ambiental), Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 26f., 2018.
- [9] MOURA, M. C. C. Avaliação do comportamento das cinzas da incineração de resíduos sólidos perigosos no tratamento de lixiviados de aterros sanitários. Dissertação (Mestrado em Tecnologia e Gestão Ambiental), Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Ceará — IFCE, Fortaleza, 98f., 2023.
- [10] PINTO, B. H. A. Estudo de argamassas com adição de cinzas do processo de incineração de resíduos sólidos dos serviços de saúde. Trabalho de Conclusão de Curso (Engenharia Ambiental), Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 24f., 2018.
- [11] SILVA, W. B. C.; BARROSO, S. H. A.; CABRAL, A. E. B. Avaliação da aplicação de cinzas pesadas de termelétrica em blocos intertravados de concreto para pavimentos. *Revista Matéria*, v.25, n.01, e-12570, 16p., 2020.
- [12] SINGH et al. Sustainable use of different size fractions of municipal solid waste incinerator bottom ash and recycled fine aggregates in cement mortar. *Case Studies in Construction Materials*, v17, e01434, dec., 2022. WANG, L. K.; HUNG, Y-T.; SHAMMAS, N. K. *Physicochemical Treatment Processes*. 1.ed. Totowa, NJ: Humana Press, Handbook of Environmental Engineering, v.3, 2004.
- [13] WANG, L. K.; HUNG, Y-T.; SHAMMAS, N. K. *Physicochemical Treatment Processes*. 1.ed. Totowa, NJ: Humana Press, Handbook of Environmental Engineering, v.3, 2004.