

Análise das correlações entre a distribuição granulométrica e a permeabilidade de cinzas provenientes da incineração de resíduos sólidos perigosos

Gemmelle Oliveira Santos^{[1]*}, Senira Marcos de Oliveira^[2], Thiago Lucas de Lima Lino^[3], Roberto Antônio Cordeiro da Silva^[4]

^{[1]*}gemmelle@ifce.edu.br, ^[2]oliveira.senira02@aluno.ifce.edu.br,

^[3]thiago.lucas.lima07@aluno.ifce.edu.br. Instituto Federal do Ceará (IFCE), Fortaleza, Ceará, Brasil

^[4]roberto@det.ufc.br. Universidade Federal do Ceará (UFC), Fortaleza, Ceará, Brasil

Resumo

Este estudo determinou e analisou as correlações entre a distribuição granulométrica e a permeabilidade de cinzas geradas pela incineração de resíduos sólidos perigosos, com base em duas campanhas experimentais conduzidas em setembro de 2023 e junho de 2024. Um total de 96 kg de materiais (cinzas e solos) foram fracionados utilizando sete peneiras com malhas variando de 0,075 mm a 2,00 mm, incluindo o material de enchimento. Observou-se que a ordem de grandeza da permeabilidade das cinzas, para ambos os fluidos de teste (água e chorume de aterro), foi superior à dos solos. Esse comportamento é atribuído às características físicas intrínsecas das cinzas, como esfericidade, forma, textura, angularidade, porosidade, fissuras e fases mineralógicas. Aproximadamente 41% dos resultados de permeabilidade das cinzas situaram-se na ordem de 10^{-2} cm/s, enquanto 50% dos resultados de permeabilidade do solo situaram-se na ordem de 10^{-6} cm/s, significativamente inferior. Após 64 ensaios de permeabilidade com carga variável, foram identificadas diferenças significativas na permeabilidade entre as campanhas, os materiais e os fluidos. Os resultados sugerem que as cinzas podem ser utilizadas como camadas intermediárias em aterros sanitários. Este é o primeiro estudo local a abordar este tema. O conhecimento gerado poderá subsidiar o desenvolvimento de novos materiais, contribuir para análises de desempenho e servir de base para futuras pesquisas. Além disso, os resultados poderão auxiliar na melhoria da classificação de resíduos perigosos, fomentando a sua reutilização e valorização, e reduzindo a sua disposição final em aterros. As análises granulométricas e de permeabilidade das cinzas abrem novas oportunidades de investigação e contribuem para uma melhor compreensão e previsão do comportamento hidráulico e ambiental deste tipo de resíduo.

Palavras-chave: chorume; cinzas; distribuição granulométrica; granulometria; permeabilidade.

Analysis of the correlations between particle size distribution and permeability of ashes from hazardous solid waste incineration

Abstract

This study determined and analyzed the correlations between particle size distribution and permeability of ashes generated from the incineration of hazardous solid waste, based on two experimental campaigns conducted in September 2023 and June 2024. A total of 96 kg of materials (ashes and soils) were fractionated using seven sieves with mesh sizes ranging from 0.075 mm to 2.00 mm, including the filler material. It was observed that the order of magnitude of ash permeability, for both test fluids (water and landfill leachate), was higher than that of the soils. This behavior is attributed to the intrinsic physical characteristics of the ashes, such as sphericity, shape, texture, angularity, porosity, fissures, and mineralogical phases. Approximately 41% of the ash permeability results were within the order of 10^{-2} cm/s, whereas 50% of the soil permeability results were in the order of 10^{-6} cm/s, significantly lower. Following 64 variable-head permeability tests, significant differences in permeability were identified between the campaigns, materials, and fluids. The findings suggest that the ashes can be used as intermediate layers in sanitary landfills. This is the first local study addressing this topic. The knowledge generated may support the development of new materials, contribute to performance analyses, and serve as a basis for future research. Additionally, the results may assist in the improvement of hazardous waste classification, fostering its reuse and valorization,

and reducing its final disposal in landfills. The particle size and permeability analyses of the ashes open new opportunities for investigation and contribute to a better understanding and prediction of the hydraulic and environmental behavior of this type of residue.

Keywords: *ash; granulometry; leachate; particle size distribution; permeability.*

1 Introdução

A Lei Federal nº 12.305/2010 (BRASIL, 2010), que institui a Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS), estabelece a obrigatoriedade de que os geradores de resíduos perigosos elaborem e cumpram um plano de gerenciamento, no qual devem ser descritos todos os procedimentos de manejo: segregação, acondicionamento, identificação, transporte interno, armazenamento temporário e externo, coleta interna, transporte externo, destinação e disposição final ambientalmente adequada.

No município de Fortaleza, estado do Ceará (CE), a apresentação do plano de gerenciamento de resíduos constitui requisito obrigatório para a obtenção do alvará de construção, do registro sanitário e do licenciamento ambiental de atividades. Os resíduos classificados como perigosos, conforme discriminado nesses planos, devem ser, obrigatoriamente, encaminhados ao Centro de Tratamento de Resíduos Perigosos (CTRP), que conta com um sistema de incineração.

A incineração é um processo de combustão controlada, realizado sob altas temperaturas, que reduz significativamente o peso, o volume e os riscos sanitários e ambientais dos resíduos perigosos. No CTRP, esse processo gera dois tipos principais de resíduos sólidos: as cinzas volantes, que se misturam aos gases tratados e são lançadas na atmosfera, e as cinzas de fundo, que são recolhidas por esteiras, acondicionadas em contêineres e transportadas para o Aterro Sanitário Metropolitano, localizado a aproximadamente 30 a 35 km do centro da capital. Ressalta-se que o aterro não deveria receber essas cinzas, uma vez que sua composição química as classifica como resíduos perigosos. De acordo com a Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS), são considerados perigosos os resíduos que apresentam uma ou mais das seguintes características: inflamabilidade, corrosividade, reatividade, toxicidade, patogenicidade, carcinogenicidade, teratogenicidade e mutagenicidade, por representarem risco significativo à saúde pública ou à qualidade ambiental.

Os estudos locais sobre as Cinzas da Incineração de Resíduos Sólidos Perigosos (CIRSP) ainda são incipientes. Bastos *et al.* (2021) e Lino (2022) realizaram investigações sobre as características físicas e químicas dessas cinzas. Correia (2022) avaliou o uso de frações do material na produção de pisos intertravados de concreto; Moura (2023) aplicou as cinzas como meio de filtração de lixiviados de aterros sanitários, em escala piloto; e Soares (2025) analisou o efeito da adição dessas cinzas sobre as propriedades físicas e mecânicas de Concretos de Cimento Portland (CCP), com substituição parcial da areia.

A partir desse contexto, a presente pesquisa visa avançar no conhecimento sobre o tema, tendo como objetivo determinar e correlacionar a distribuição granulométrica com a permeabilidade da CIRSP. A análise granulométrica das cinzas foi comparada à de amostras do solo de cobertura do Aterro Sanitário Metropolitano, localizado no município de Caucaia (CE). A permeabilidade das cinzas à água foi, por sua vez, comparada à sua permeabilidade aos lixiviados provenientes do referido aterro. Tanto as amostras de solo quanto as de cinza foram ensaiadas com esses dois fluidos, permitindo a análise comparativa.

O estudo da correlação entre a permeabilidade e a granulometria contribui para a compreensão do comportamento hidráulico e ambiental das cinzas. A caracterização granulométrica, especificamente, é essencial para diversas aplicações, como: i) o reaproveitamento das cinzas em processos industriais, a exemplo da produção de cimento e da estabilização de solos, nos quais a granulometria influencia diretamente a reatividade; ii) a avaliação da disposição final sobre o solo, dado que o tamanho das partículas interfere na mobilidade e dispersão de seus componentes químicos no ambiente, com possíveis implicações ambientais; e iii) o dimensionamento de sistemas de transporte, armazenamento e tratamento, que depende das características físicas do material.

Adicionalmente, os resultados sobre a permeabilidade das cinzas podem subsidiar o desenvolvimento de novos materiais, contribuir com análises de desempenho e embasar futuras pesquisas. Os dados obtidos também têm o potencial de apoiar a revisão e o aprimoramento da

classificação deste tipo de resíduo, conforme os critérios estabelecidos pela NBR 10004/2024 (ABNT, 2024) e pela Resolução nº 316/2002 (BRASIL, 2002) do Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA). Por fim, os achados desta pesquisa contribuem com indicadores locais de sustentabilidade e ampliam o corpo de conhecimento técnico-científico relacionado à gestão desse resíduo.

A presente pesquisa também está alinhada à PNRS, que prevê a cooperação técnica e financeira entre os setores público e privado para o desenvolvimento de pesquisas voltadas à criação de novos produtos, métodos, processos e tecnologias de gestão, reciclagem, reutilização, tratamento de resíduos e disposição final ambientalmente adequada de rejeitos.

O estudo das cinzas do incinerador possibilita a valorização e a potencial reutilização desse resíduo, reduzindo a prática atual de sua disposição em solo no Aterro Sanitário Metropolitano. Conforme exposto por Carvalho *et al.* (2022), a reutilização adequada dos resíduos depende do conhecimento técnico de suas propriedades, bem como da realização de testes que comprovem a segurança de uso e a conformidade com a legislação vigente, de modo a evitar impactos à saúde pública e ao meio ambiente.

As seções seguintes deste artigo apresentam, na Seção 2, o sistema de incineração empregado na cidade de Fortaleza, bem como os procedimentos de amostragem e análise das cinzas; na Seção 3, os experimentos realizados para a determinação da permeabilidade e os resultados comparativos com a literatura; e, por fim, na Seção 4, as conclusões do estudo.

2 Material e métodos

A cinza utilizada nesta pesquisa é proveniente da queima de resíduos sólidos realizada no incinerador instalado no Centro de Tratamento de Resíduos Perigosos (CTRP), localizado na Rua Estrada do Itaperi, nº 745, Bairro Passaré, em Fortaleza (Figuras 1a e 1b).

Figura 1 – (a) Localização do Centro de Tratamento de Resíduos Perigosos (CTRP), Fortaleza (CE). (b) Vista geral do incinerador estudado, Fortaleza (CE)



Fonte: arquivo dos autores

Segundo Silva e Santos (2019), o incinerador de Fortaleza foi inaugurado em 2001, inicialmente operado pela empresa Contenur do Brasil. A partir de 2002, a operação foi assumida pela empresa Marquise Ambiental, sob a supervisão de um engenheiro da Prefeitura Municipal. Conforme Moura (2023), o equipamento processa cerca de nove toneladas diárias de resíduos sólidos perigosos, sendo aproximadamente 98% oriundos de serviços de saúde (humanos e veterinários) e 2% de resíduos industriais diversos. A queima desses materiais gera uma cinza de fundo heterogênea, com fragmentos

de vidro, agulhas e pequenos pedaços de alumínio. Estima-se que as cinzas correspondam a cerca de 10% do volume total incinerado diariamente.

Viana (2013) informa que o incinerador é do tipo leito fluidizado, com duas câmaras de combustão. A câmara primária opera a cerca de 900 °C e a câmara secundária, responsável pelo tratamento dos gases antes da liberação para a atmosfera, atinge aproximadamente 1.000 °C.

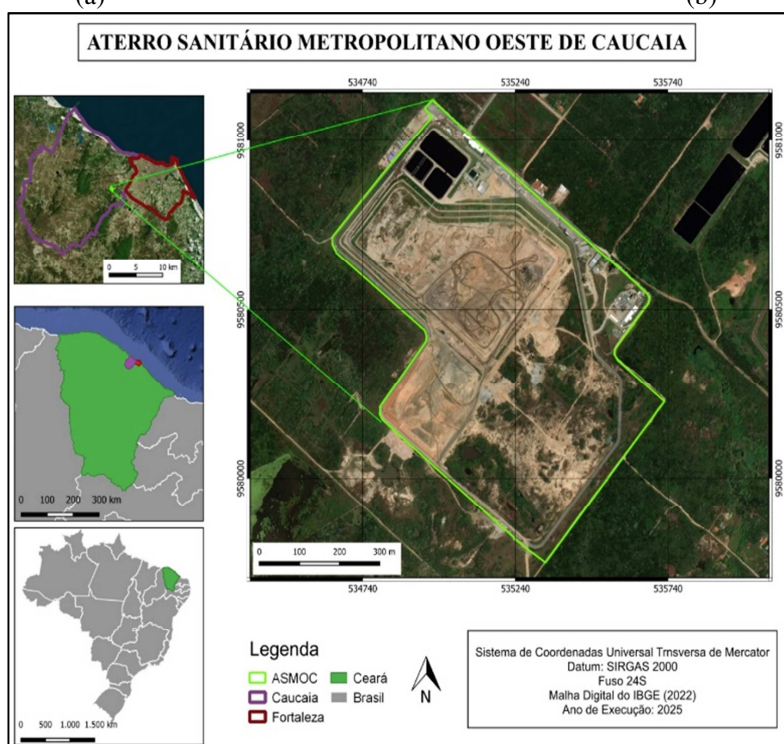
De acordo com Lino (2022), os resíduos (Figura 2a) são recebidos, pesados e lançados em um fosso, de onde são transportados para as câmaras de combustão. As cinzas de fundo resultantes do processo são então levadas por esteiras até um contêiner (Figura 2b), de onde foram extraídas as amostras utilizadas neste estudo. Essas cinzas, por rotina, são posteriormente encaminhadas ao Aterro Sanitário Metropolitano, situado em Caucaia (CE), a cerca de 30-35 km do CTRP (Figura 2c).

Figura 2 – (a) Resíduos sólidos perigosos antes da incineração. (b) Cinzas acondicionadas em contêiner após incineração. (c) Localização do Aterro Sanitário Metropolitano, Caucaia (CE)



(a)

(b)



(c)

Fonte: arquivo dos autores

As amostras das cinzas foram coletadas em duas etapas: a primeira em setembro de 2023 e a segunda em junho de 2024. Inicialmente, os materiais grosseiros (vidros, metais e objetos perfurocortantes) foram retirados manualmente com o auxílio de pinças e peneiras com abertura de 4,76 mm. Em seguida, as cinzas foram dispostas em bandejas e submetidas à secagem ao ar livre por 24 horas (Figura 3), visando à redução do teor de umidade. A presença de materiais grosseiros também foi registrada por Andrade (2012), que encontrou 34% desse tipo de material nas amostras analisadas, e por Gupta *et al.* (2021), que reportaram percentuais entre 10% e 20%.

Figura 3 – Triagem manual das cinzas estudadas



Fonte: arquivo dos autores

No Laboratório de Mecânica dos Solos, vinculado ao Departamento de Engenharia Hidráulica e Ambiental da Universidade Federal do Ceará (UFC), foram armazenadas aproximadamente 50 kg de cinzas e 50 kg de solos provenientes da camada de cobertura do Aterro Sanitário Metropolitano.

Para a determinação do fracionamento granulométrico dos dois materiais, foram utilizadas sete peneiras com malhas variando entre 0,075 mm e 2,00 mm. O material fino (fíler) obtido no processo de peneiramento foi igualmente aproveitado nos ensaios. O peneiramento foi realizado até se obter 1,5 kg de material passante por peneira em cada campanha experimental (Tabela 1, Figura 4). Adicionalmente, outros ensaios foram realizados com ambos os materiais (Tabela 2). As amostras foram tratadas e analisadas conforme cada campanha, ou seja, de forma isolada.

Tabela 1 – Quantidades de materiais (kg) e fluidos de contato utilizados na pesquisa

Peneira (mm)	Tabela 1 – Quantidades de materiais (kg) e hardos de contato utilizados na pesquisa							
	1ª campanha				2ª campanha			
	Quantidade de material utilizado (kg)							
	Cinza		Solo		Cinza		Solo	
	Água	Lixiviado	Água	Lixiviado	Água	Lixiviado	Água	Lixiviado
2,00	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5
1,18	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5
0,60	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5
0,45	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5

0,30	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5
0,15	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5
0,075	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5
Fíler	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5
Total	12,0	12,0	12,0	12,0	12,0	12,0	12,0	12,0

Fonte: dados da pesquisa

Figura 4 – Processamento das amostras de cinzas



Fonte: arquivo dos autores (2025)

Tabela 2 – Lista de ensaios complementares realizados em solos e cinzas

Análise	Material		Referência/Método
	CIRSP	Solos	
Granulometria	03	02	NBR 7181/2018
Teor de umidade natural	09	06	Estufa a 60-65 °C por 24 horas
Densidade real	02	02	NBR 6508/2017

CIRSP: Cinza da Incineração de Resíduos Sólidos Perigosos

Fonte: autores (2025)

Nos ensaios de permeabilidade, além das sete frações granulométricas, também foi utilizado o fíler. Inicialmente, foi determinada a permeabilidade do solo à água e, posteriormente, ao lixiviado proveniente da quarta lagoa de estabilização do aterro, escolhido pela facilidade de acesso. O mesmo procedimento foi replicado para as amostras de cinzas.

Ao todo, foram realizados 64 ensaios de permeabilidade com carga variável, conforme os critérios da NBR 14545/2021 (ABNT, 2021), sendo 32 com solo e 32 com cinzas, contemplando ambas as campanhas experimentais.

A exemplo do procedimento adotado por Silva (2022), os corpos de prova foram inicialmente saturados por percolação ascendente, seguida de percolação descendente, com medições das cargas hidráulicas, dos tempos de escoamento e da temperatura do fluido, o que possibilitou a obtenção do coeficiente de permeabilidade, expresso em cm/s. Em algumas amostras, o ensaio de permeabilidade com lixiviado foi conduzido conforme o procedimento descrito por Soares (2012) e Costa (2019): primeiro, realizou-se a saturação com água, seguida pela substituição do fluido pelo lixiviado, cujas características estão apresentadas na Tabela 3.

Tabela 3 – Características físicas e químicas do lixiviado

Parâmetros	1ª campanha	2ª campanha
pH à 25°C	8,3	8,7
Cloretos (mg/L)	4.475,6	4.448,5
Cor aparente (uH)	2.370,0	4.976,7
Fósforo (mg/L)	0,7	434,4
DQO (mg/L)	594,8	8.338,8

Materiais sedimentáveis (mg/L)	2,0	0,1
Sólidos dissolvidos (mg/L)	11.834,0	13.948,0
Nitrato (mg/L)	0,3	27,1
Nitrito (mg/L)	2,8	0,6
Nitrogênio amoniacal (mg/L)	1.547,7	1.120,0
Óleos e graxas (mg/L)	326,0	118,0
Sulfato (mg/L)	9,1	337,0
Sulfeto (mg/L)	2,4	9,0
Turbidez (mg/L)	264,0	335,3

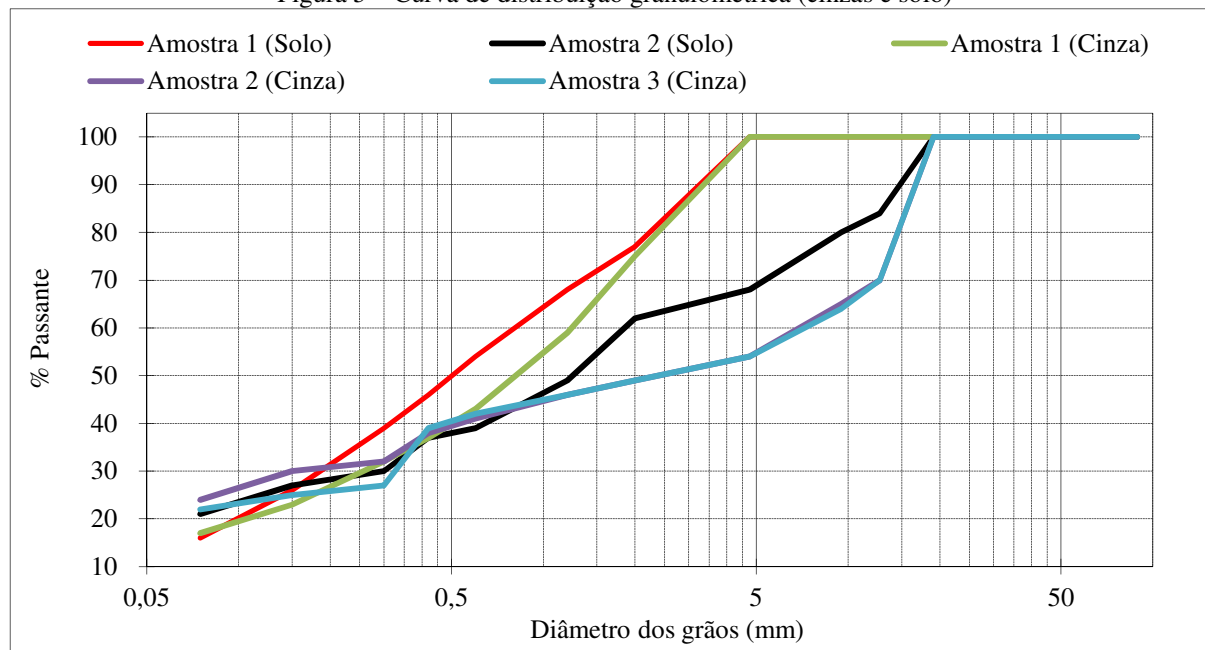
Fonte: Moura (2023)

3 Resultados e discussão

A análise granulométrica indicou que o solo estudado apresentou as seguintes proporções: 25,0% de areia média, 24,0% de areia fina, 23,0% de siltes/argilas, 20,0% de areia grossa e 8,0% de pedregulho. Já a CIRSP apresentou 25,0% de material com finura semelhante à de siltes/argilas, 20,0% semelhante a pedregulho, 19,0% de areia grossa, 18,0% de areia média e 18,0% de areia fina (Figura 5). Observa-se que as proporções das frações granulométricas nos dois materiais analisados variaram significativamente, influenciando diretamente suas respectivas permeabilidades.

Com base apenas na granulometria e segundo o Sistema Unificado de Classificação dos Solos (SUCS), o solo analisado foi classificado como areia argilosa. Oliveira (2011), realizando estudos no aterro sanitário de Caucaia (CE), classificou o solo como areia fina silto-argilosa, evidenciando o predomínio da fração arenosa. De modo geral, solos com maior percentual de areia tendem a apresentar maior permeabilidade e menor coesão, enquanto aqueles com predominância de argila são menos permeáveis e mais coesivos, o que impacta diretamente a permeabilidade.

Figura 5 – Curva de distribuição granulométrica (cinzas e solo)



Fonte: dados da pesquisa

Diversos estudos na literatura também determinaram a granulometria de solos utilizados como camadas de cobertura em aterros sanitários, bem como de cinzas provenientes de equipamentos de

incineração de resíduos sólidos perigosos (Tabelas 4 e 5). Contudo, é necessária cautela nas comparações, pois os solos analisados são característicos de cada região, os resíduos possuem diferentes composições físico-químicas e os incineradores variam em tecnologia e operação. A variabilidade entre os estudos também decorre do período e local de realização, bem como dos critérios distintos empregados na classificação dos materiais.

Tabela 4 – Granulometria das cinzas de resíduos sólidos perigosos (pesquisa *versus* literatura)

Autor(es)	Local	Composição granulométrica (%)				
		P	AG	AM	AF	S/A
Dados da pesquisa	Fortaleza (CE)	0,0	25,0	38,0	20,0	17,0
		30,0	16,0	8,0	19,0	27,0
		30,0	16,0	8,0	13,0	32,0
Bastos <i>et al.</i> (2021)		26,0	17,0	17,0	19,0	21,0
Lino (2022)		22,7	24,5	22,7	13,2	21,0
Correia (2022)		26,0	13,0	24,0	15,0	22,0
Moura (2023)		20,8	24,8	23,2	13,6	17,6
Silveira; Casagrande; Quispe (2013)	Ilha do Fundão (RJ)	0,0	1,0	18,0	35,0	46,0
Bragagnolo <i>et al.</i> (2018)	Caxias do Sul (RS)	0,0	13,0	38,0	31,0	18,0
Graupmann <i>et al.</i> (2019)	Mafra (SC)	0,0	23,0	30,0	22,0	25,0

Legenda: P (pedregulho), AG (areia grossa), AM (areia média), AF (areia fina), S/A (silte e argila)

Fonte: dados da pesquisa

Tabela 5 – Granulometria dos solos de cobertura de aterro sanitário (pesquisa *versus* literatura)

Autor(es)	Local	Composição granulométrica (%)				
		P	AG	AM	AF	S/A
Dados da pesquisa	Fortaleza (CE)	17	16	19	18	30
		0	23	31	30	16
Araújo <i>et al.</i> (2016)	Campina Grande (PB)	0,06	1,94	20,0	28,0	52,0
Antunes <i>et al.</i> (2018)		0,10	11,6	28,1	30,0	30,1
Costa <i>et al.</i> (2018)	Jaboatão dos Guararapes (PE)	0,84	11,64	17,63	13,68	55,63
Dornelles <i>et al.</i> (2016)	Santa Maria (RS)	–	–	1,0	15,0	84,0

Legenda: P (pedregulho), AG (areia grossa), AM (areia média), AF (areia fina), S/A (silte e argila)

Fonte: dados da pesquisa

Aguilar *et al.* (2002) classificaram a granulometria das cinzas da incineração de resíduos sólidos urbanos de municípios da região metropolitana do Porto (Portugal) como levemente mais grosseira do que a do cimento Portland tipo I, classe 32,5R. Dourado (2013), ao avaliar a aplicabilidade de cinzas de fundo em camadas de pavimentação, e Vizcarra (2010), em estudo semelhante, identificaram que aproximadamente 63% das cinzas analisadas apresentaram características granulométricas compatíveis com areia siltosa.

Mendonça (2018), ao estudar cinzas provenientes da incineração de resíduos de serviços de saúde em Belém do Brejo do Cruz, estado da Paraíba (PB), constatou distribuição granulométrica aparentemente uniforme, com maior concentração de partículas entre 0,3 mm e 0,6 mm. Segundo o autor, essas cinzas se assemelham à finura da areia média e estão compatíveis com as faixas do módulo de finura de agregados miúdos estabelecidas em norma. Ainda conforme Mendonça, o uso dessas cinzas na produção de concretos e argamassas seria tecnicamente viável.

Nesta pesquisa, o teor de umidade médio da CIRSP foi de 4,05% (nove amostras), enquanto o do solo de cobertura foi de 2,90% (seis amostras). A literatura dispõe de poucos dados sobre a umidade desse tipo de cinza (Tabela 6).

Tabela 6 – Teor de umidade da CIRSP e de solos de aterro sanitário na literatura

Material	Autor(es)	Local	Resultados (%)
Cinzas	Bastos <i>et al.</i> (2021)	Fortaleza (CE)	20,0 – 28,0
	Lino (2022)		2,14 – 51,75
	Moura (2023)		2,0 – 52,0

	Silva; Lange (2008)	Belo Horizonte (MG)	0,9 – 5,6
	Alam; Singh; Kumar (2022)	Punjab (Índia)	18,5
Solos	Costa (2019)	Campina Grande (PB)	2,5
	Lima (2022)		2,3

Fonte: dados da pesquisa

Moura (2023), que também analisou as cinzas estudadas nesta pesquisa, destacou que a umidade do material está diretamente associada aos procedimentos de lavagem dos gases (alcalina e ácida), ao uso de água para interrupção da combustão, ao resfriamento dos equipamentos antes das paradas de manutenção e ao tempo de exposição das cinzas ao ambiente antes da coleta para análise.

O resultado da densidade real da CIRSP variou entre 2,378 e 2,729 g/cm³, valores compatíveis com os encontrados na literatura. Para o solo, os valores variaram entre 2,740 e 2,950 g/cm³ (Tabela 7). Essa variação pode estar relacionada à natureza e composição dos resíduos, ao processo de incineração adotado e ao método analítico empregado (Carvalho, 2023; Silva; Lange, 2008).

Tabela 7 – Densidade real da CIRSP e de solos de aterro sanitária na literatura

Material	Autor(es)/ano	Local	Densidade
Cinzas	Moura (2023)	Fortaleza (CE)	2,06 – 2,36
	Vizcarra (2010)	Rio de Janeiro (RJ)	2,43
	Alencar (2022)	Belém do Brejo do Cruz (PB)	1,76
	Mendonça (2018)		2,03
	Carvalho (2023)		2,80
	Pinto (2018)	Natal (RN)	2,06
	Alam; Singh; Kumar (2022)	Punjab (Índia)	2,07
	Silva; Lange (2008)	Belo Horizonte (MG)	1,93 – 2,18
Solos	Costa <i>et al.</i> (2018)	Jaboatão dos Guararapes (PE)	2,72
	Dornelles <i>et al.</i> (2016)	Santa Maria (RS)	18,79
	Lima (2022)	Campina Grande (PB)	2,67

Fonte: dados da pesquisa

Os resultados de permeabilidade estão apresentados na Tabela 8, organizados de acordo com as frações peneiradas da cinza e do solo, bem como com os fluidos de contato utilizados (água e lixiviado).

Tabela 8 – Resultados de permeabilidade (cinza, solo, água e lixiviado)

Peneiras (mm)	Permeabilidade (cm/s)				
	Campanha	Cinzas		Solo	
		Água	Lixiviado	Água	Lixiviado
# 2	1 ^a	$5,9 \times 10^{-2}$	$1,7 \times 10^{-1}$	$7,0 \times 10^{-6}$	$2,9 \times 10^{-5}$
	2 ^a	$3,2 \times 10^{-5}$	$2,0 \times 10^{-2}$	$1,5 \times 10^{-6}$	$4,6 \times 10^{-6}$
# 1,18	1 ^a	$7,7 \times 10^{-2}$	$2,3 \times 10^{-2}$	$1,3 \times 10^{-6}$	$7,6 \times 10^{-5}$
	2 ^a	$6,9 \times 10^{-4}$	$1,8 \times 10^{-2}$	$1,4 \times 10^{-6}$	$3,4 \times 10^{-6}$
# 0,6	1 ^a	$5,6 \times 10^{-2}$	$1,2 \times 10^{-2}$	$1,4 \times 10^{-6}$	$7,7 \times 10^{-5}$
	2 ^a	$3,2 \times 10^{-4}$	$2,1 \times 10^{-2}$	$2,4 \times 10^{-7}$	$3,0 \times 10^{-6}$
# 0,425	1 ^a	$4,0 \times 10^{-2}$	$1,2 \times 10^{-2}$	$2,7 \times 10^{-6}$	$9,4 \times 10^{-5}$
	2 ^a	$2,1 \times 10^{-3}$	$2,1 \times 10^{-2}$	$5,0 \times 10^{-7}$	$2,4 \times 10^{-5}$
# 0,3	1 ^a	$2,0 \times 10^{-2}$	$3,9 \times 10^{-3}$	$4,5 \times 10^{-6}$	$1,1 \times 10^{-5}$
	2 ^a	$2,1 \times 10^{-3}$	$2,5 \times 10^{-4}$	$3,0 \times 10^{-7}$	$4,8 \times 10^{-6}$
# 0,15	1 ^a	$5,1 \times 10^{-2}$	$2,2 \times 10^{-4}$	$1,0 \times 10^{-6}$	$1,4 \times 10^{-5}$
	2 ^a	$1,1 \times 10^{-3}$	$2,5 \times 10^{-4}$	$6,1 \times 10^{-7}$	$6,2 \times 10^{-6}$
# 0,075	1 ^a	$1,6 \times 10^{-5}$	$2,4 \times 10^{-4}$	$5,2 \times 10^{-7}$	$2,0 \times 10^{-5}$
	2 ^a	$6,2 \times 10^{-5}$	$4,8 \times 10^{-5}$	$2,4 \times 10^{-7}$	$8,4 \times 10^{-6}$
Filer	1 ^a	$3,0 \times 10^{-5}$	$2,8 \times 10^{-4}$	$3,1 \times 10^{-7}$	$7,8 \times 10^{-6}$
	2 ^a	$5,4 \times 10^{-5}$	$4,9 \times 10^{-5}$	$2,8 \times 10^{-7}$	$6,6 \times 10^{-6}$

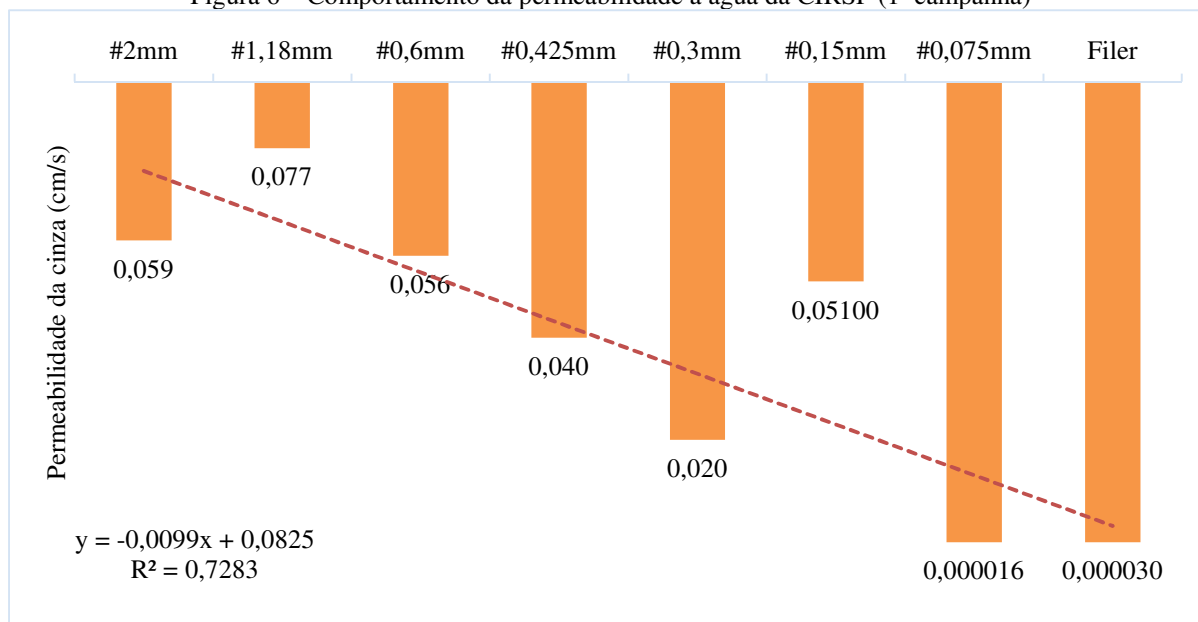
Fonte: dados da pesquisa

Em termos gerais, observou-se variação na permeabilidade entre as campanhas, os materiais e os fluidos aplicados. A média geral de permeabilidade durante a 2ª campanha (junho de 2024) foi inferior à da 1ª campanha (setembro de 2023), indicando alterações na qualidade e no comportamento hidráulico dos materiais ao longo do tempo.

Considerando os valores médios, a CIRSP demonstrou menor permeabilidade à água na 2ª campanha ($8,0 \times 10^{-4}$ cm/s) em comparação à 1ª campanha ($3,8 \times 10^{-2}$ cm/s). O mesmo comportamento foi verificado com o uso de lixiviado como fluido de contato ($2,8 \times 10^{-2}$ cm/s na 2ª campanha e $1,0 \times 10^{-2}$ cm/s na 1ª campanha).

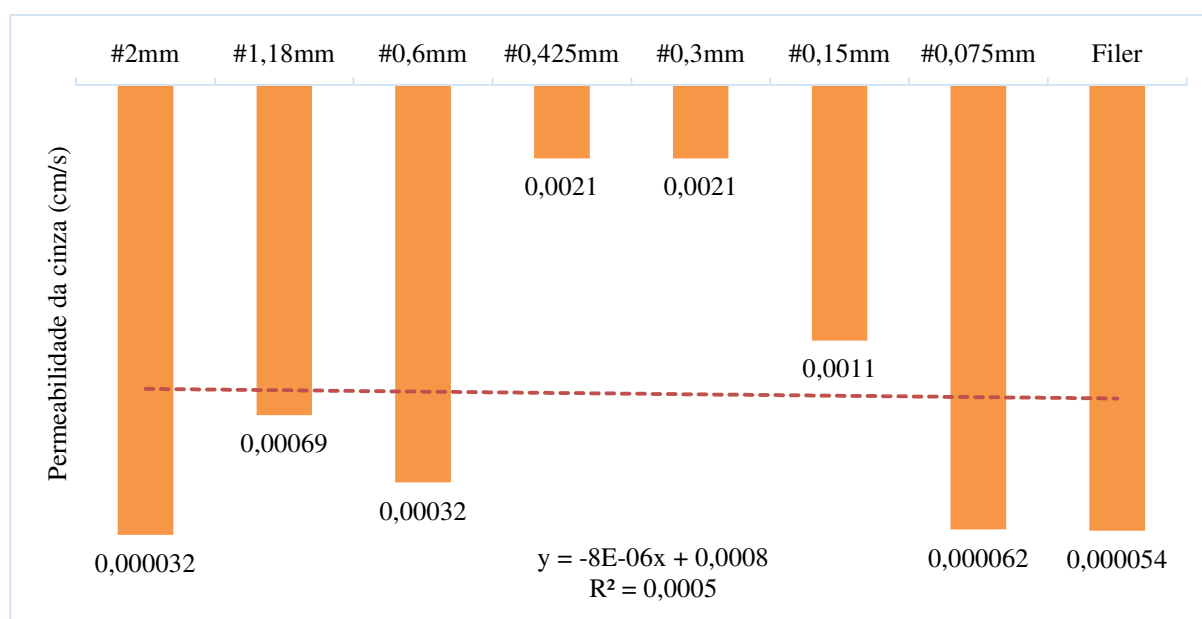
De forma mais específica, constatou-se redução da permeabilidade à água com a diminuição da granulometria da CIRSP. Essa tendência foi mais evidente na 1ª campanha (Figura 6), conforme indicado pelo coeficiente angular negativo da equação da reta de regressão linear e pelo coeficiente de correlação $R^2 = 0,7283$, do que na 2ª campanha (Figura 7), cujo R^2 foi de apenas 0,0005. Com relação à permeabilidade ao lixiviado, o comportamento inverso foi observado: a tendência foi mais pronunciada na 2ª campanha (Figura 9, com $R^2 = 0,7316$) do que na 1ª (Figura 8, com $R^2 = 0,4566$). As Figuras 6 a 9 estão apresentadas em escala logarítmica.

Figura 6 – Comportamento da permeabilidade à água da CIRSP (1ª campanha)



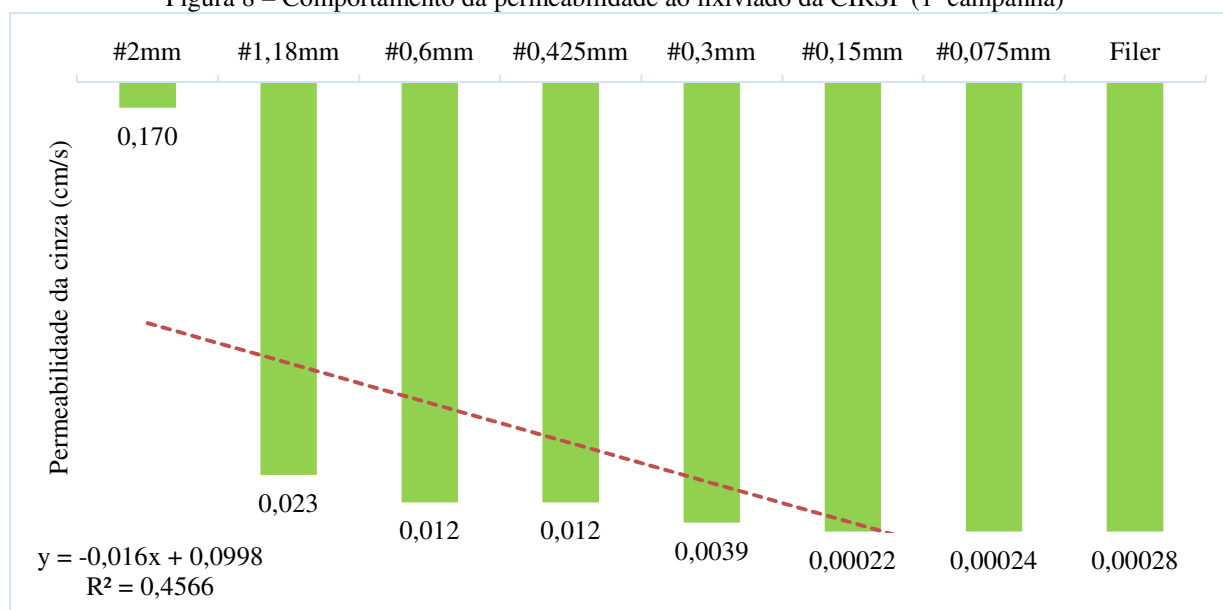
Fonte: dados da pesquisa

Figura 7 – Comportamento da permeabilidade à água da CIRSP (2ª campanha)



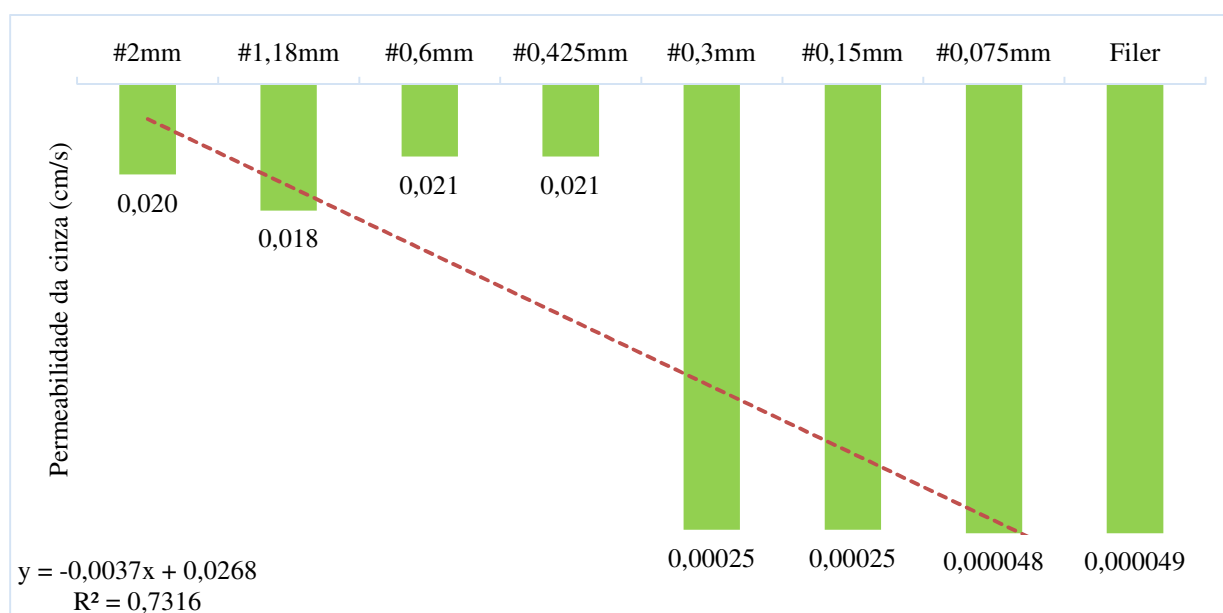
Fonte: dados da pesquisa

Figura 8 – Comportamento da permeabilidade ao lixiviado da CIRSP (1ª campanha)



Fonte: dados da pesquisa

Figura 9 – Comportamento da permeabilidade ao lixiviado da CIRSP (2ª campanha)



Fonte: dados da pesquisa

A ordem de grandeza (10^x) de todos os resultados apresentados na Tabela 8 permitiu observar que a permeabilidade das cinzas, para ambos os fluidos de contato, foi superior à permeabilidade dos solos. Constatou-se, por exemplo, que 41% dos resultados da permeabilidade da cinza apresentaram ordem de grandeza de 10^{-2} cm/s, enquanto 50% dos resultados da permeabilidade dos solos situaram-se na escala de 10^{-6} cm/s, consideravelmente menor. Dessa forma, as cinzas demonstraram comportamento de permeabilidade semelhante ao de materiais granulares.

Tal resultado era esperado, uma vez que as cinzas constituem um material antropogênico, de origem e composição físico-química diversas, ao passo que o solo é um recurso natural com mineralogia relativamente homogênea, arranjo de partículas, textura e composição física mais conhecida e regular.

Moura (2023), ao medir a esfericidade, forma, textura e angularidade das cinzas por meio de Processamento Digital de Imagens (PDI), utilizando o sistema *Aggregate Image Measurement System* (AIMS), demonstrou que as cinzas graúdas são pouco esféricas, moderadamente rugosas e subangulares, enquanto as frações mais finas foram classificadas como subarredondadas e semialongadas, sugerindo o potencial uso das cinzas como meio filtrante. Segundo a autora, as características físicas dessas cinzas indicam a formação de macroporos e dutos, os quais favorecem a infiltração, o que auxilia na compreensão da maior permeabilidade observada, em comparação ao solo.

Macroporos também foram relatados na pesquisa de Lima (2022), em que misturas de solo-bentonita, utilizadas como camada de base de aterro sanitário, foram submetidas a ensaios de permeabilidade com lixiviado. A literatura citada por esse autor aponta que o elevado potencial de interação química entre os materiais ensaiados e o lixiviado promove o colapso da dupla camada difusa, acarretando aumento da macroporosidade e, consequentemente, da permeabilidade. Tal fenômeno pode também ter ocorrido nas amostras de cinza aqui analisadas.

Conforme Martins (2017), os líquidos oriundos da decomposição dos resíduos (percolados) podem degradar o sistema de impermeabilização de fundo de aterros sanitários, aumentando sua permeabilidade. Caso esse efeito tenha se manifestado neste estudo, ele pode auxiliar na explicação da permeabilidade observada ao lixiviado.

As fases cristalinas das cinzas também influenciam sua permeabilidade. Moura (2023), ao realizar análise cristalográfica do mesmo material, identificou cinco fases: hidroxissulfato de alumínio e cálcio (etringita), dióxido de titânio (rutilo), dióxido de silício (quartzo), carbonato de cálcio (calcita) e óxido férrico (hematita). Dentre essas, três merecem destaque: a etringita, descrita como uma estrutura cristalina em forma de agulhas, pode formar um leito poroso e permeável (Ferreira; Lima; Leão,

2011); o rutilo apresenta potencial como meio filtrante, dada sua capacidade de retenção de partículas sólidas e impurezas (Carard, 2018); e o quartzo, principal componente da areia, é amplamente utilizado em sistemas de filtração.

Singh *et al.* (2022) observaram que as partículas de cinza apresentavam formas irregulares e angulares em todas as faixas granulométricas analisadas. Gupta *et al.* (2021) também identificaram partículas aglomeradas, de forma irregular e superfície rugosa. Tais propriedades contribuem para a compreensão da maior permeabilidade das cinzas, frente aos solos, observada nos ensaios realizados com ambos os fluidos de contato.

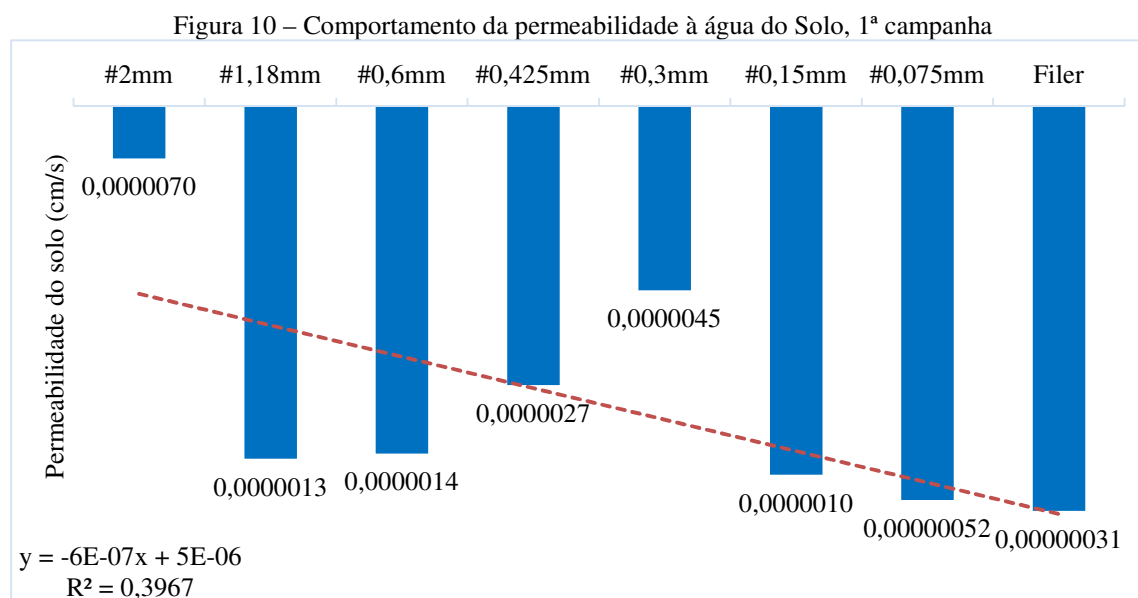
Yvon *et al.* (2006) apresentaram conclusões relevantes que podem ser correlacionadas aos resultados desta pesquisa: (i) as cinzas desenvolvem microfissuras com o tempo, elevando sua permeabilidade e permitindo maior percolação de fluidos; (ii) a elevada permeabilidade das cinzas favorece a lixiviação, ou seja, a dissolução e transporte de poluentes; (iii) a circulação de líquidos pelas microfissuras pode desencadear reações químicas entre os poluentes contidos nas cinzas e os constituintes dos fluidos, resultando na remoção de contaminantes ou formação de subprodutos; (iv) tais microfissuras podem comprometer a estabilidade física das cinzas ao longo do tempo.

A análise das Figuras 8 e 9 revelou que, nos ensaios com as frações finas da CIRSP, os valores de permeabilidade ao lixiviado foram mais homogêneos e menores. Esse padrão não se repetiu quando o fluido utilizado foi a água (Figuras 6 e 7), indicando comportamento distinto.

A literatura é escassa quanto à permeabilidade de cinzas semelhantes. Moura (2023) obteve valor de permeabilidade à água da ordem de $3,2 \times 10^{-5}$ cm/s. No presente estudo, essa ordem de grandeza foi registrada apenas nas amostras passantes nas peneiras #0,075 e fíler (em ambas as campanhas experimentais), bem como na peneira #2 na segunda campanha.

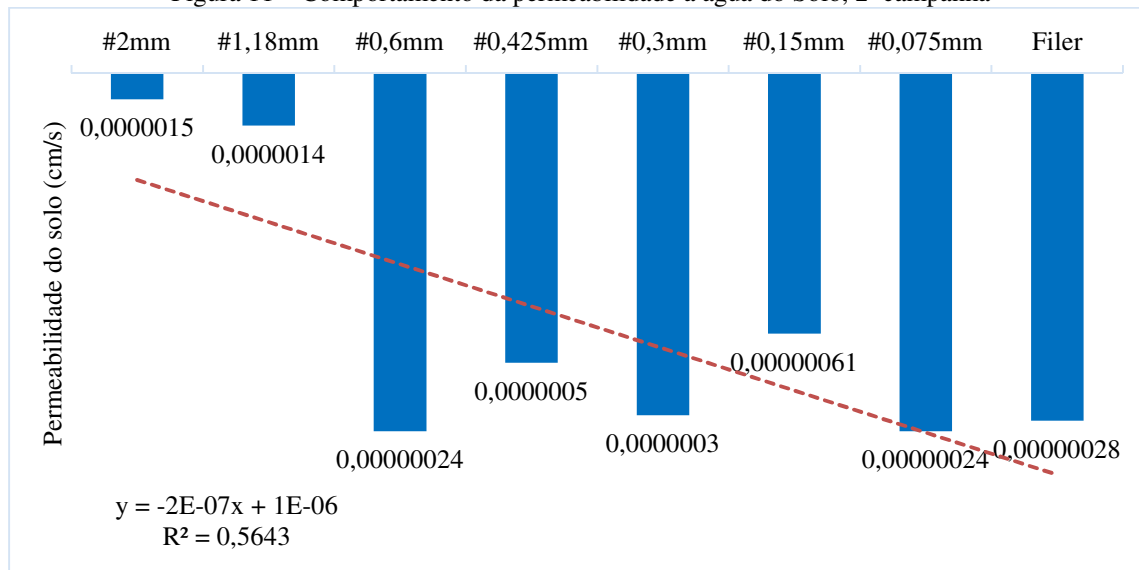
Considerando os valores médios, o solo foi menos permeável à água na segunda campanha ($6,0 \times 10^{-7}$ cm/s) do que na primeira ($2,3 \times 10^{-6}$ cm/s). Com o lixiviado, a mesma tendência foi observada: $7,6 \times 10^{-6}$ cm/s na segunda campanha e $4,1 \times 10^{-5}$ cm/s na primeira. Elias (2018), ao estudar o solo do mesmo aterro, reportou permeabilidade à água de $1,09 \times 10^{-7}$ cm/s. Esse valor foi verificado em 50% dos resultados desta pesquisa (oito ocorrências).

A permeabilidade à água apresentou tendência de redução com a diminuição da granulometria do solo, sobretudo na segunda campanha, como indicado pelo coeficiente angular negativo da equação de regressão linear e pelo coeficiente de correlação ($R^2 = 0,5643$ – Figura 11), valor superior ao obtido na primeira campanha ($R^2 = 0,3967$ – Figura 10).



Fonte: dados da pesquisa

Figura 11 – Comportamento da permeabilidade à água do Solo, 2ª campanha



Fonte: dados da pesquisa

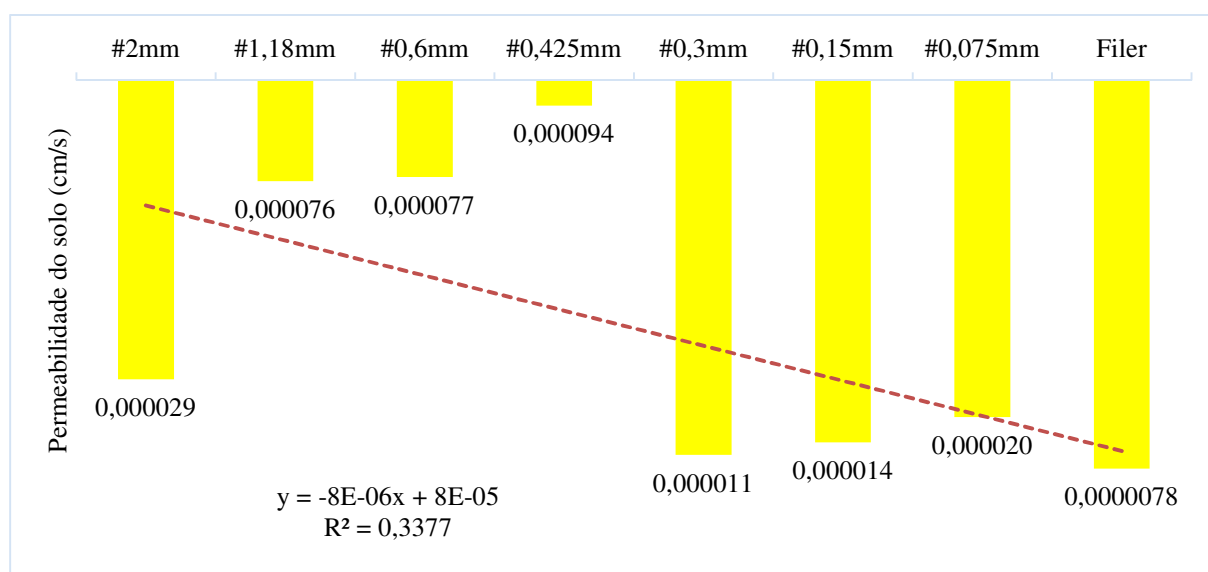
Elias (2018) ressalta que, mesmo com a água como fluido percolante, características específicas podem alterar a condutividade hidráulica do meio. Fatores como quantidade de ar dissolvido, tipo e concentração de eletrólitos e teor de nutrientes podem influenciar significativamente a permeabilidade do solo.

Lima (2022) mediu a permeabilidade à água e ao lixiviado de misturas solo-bentonita. Os comportamentos foram estatisticamente distintos, sendo a permeabilidade ao lixiviado até duas ordens de grandeza superior, apesar de sua maior viscosidade. Para o autor, o processo de saturação e percolação alterou as propriedades físicas do material, efeito associado à elevada concentração iônica e à presença de compostos químicos no lixiviado, como metais pesados e sais, que intensificam a porosidade e a permeabilidade. Nascentes (2006) também observou aumento no coeficiente de permeabilidade do solo com o uso de lixiviado em ensaios.

De modo geral, os comportamentos descritos na literatura foram igualmente observados neste estudo, ou seja, maior permeabilidade ao lixiviado em comparação à água, atribuída às alterações estruturais causadas pelo fluido contaminante.

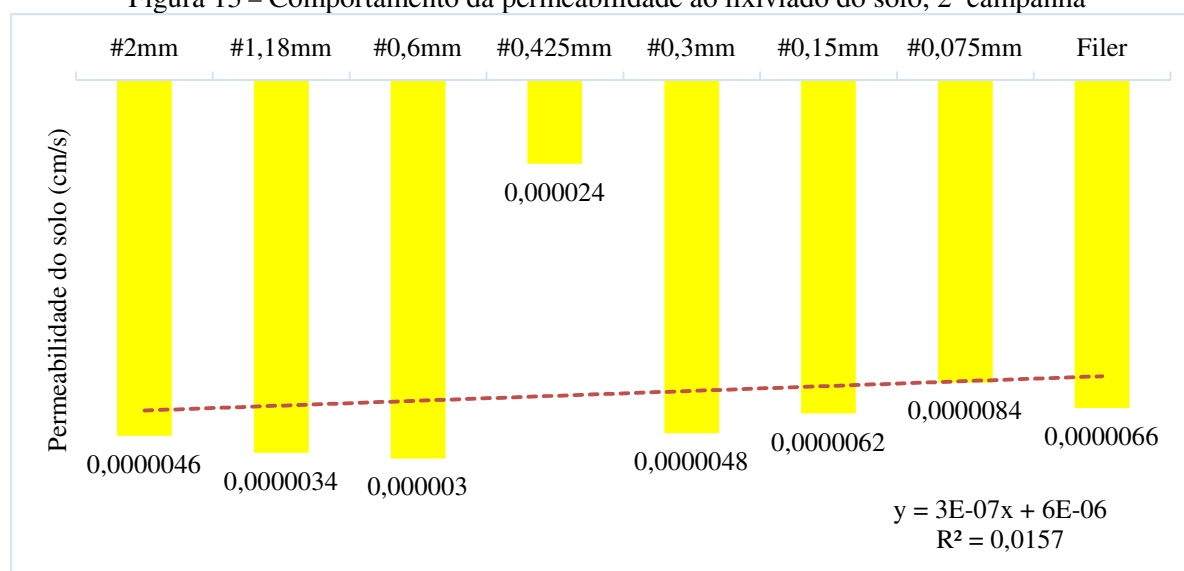
Na primeira campanha, a permeabilidade do solo ao lixiviado reduziu-se com a diminuição da granulometria (Figura 12 – $R^2 = 0,3377$). No entanto, na segunda campanha, verificou-se o oposto: a permeabilidade aumentou com a redução da granulometria (Figura 13), conforme o coeficiente angular positivo da regressão linear.

Figura 12 – Comportamento da permeabilidade ao lixiviado do solo, 1ª campanha



Fonte: dados da pesquisa

Figura 13 – Comportamento da permeabilidade ao lixiviado do solo, 2ª campanha



Fonte: dados da pesquisa

Como mencionado, as cinzas de fundo do CTRP são atualmente destinadas ao Aterro Sanitário Metropolitano. Considerando os resultados laboratoriais obtidos, é pertinente discutir o aproveitamento desse material como barreira de impermeabilização de fundo (*liners*). Todavia, apenas duas amostras da CIRSP (12,5% do total) apresentaram permeabilidade ao lixiviado compatível com os limites estabelecidos para camadas de base de aterros sanitários (mínimo de 10^{-5} cm/s, segundo a NBR 13896 (ABNT, 1997): a amostra passante na peneira #0,075 e o filer, ambas na segunda campanha ($4,8 \times 10^{-5}$ cm/s e $4,9 \times 10^{-5}$ cm/s, respectivamente). Caso a cinza seja submetida a algum tipo de processamento (calcinação, mistura prévia com solos e/ou bentonita e/ou cal) ou a uma energia de compactação distinta da Proctor Normal, esses resultados podem ser aprimorados.

Observa-se que as cinzas analisadas apresentam potencial de uso em camadas intermediárias de aterros sanitários, nas quais a elevada permeabilidade não constitui um entrave técnico, devido à necessidade de permitir o fluxo de gases e lixiviados entre as camadas. As camadas intermediárias têm a função de proteger a superfície das células de resíduos sólidos, eliminar a proliferação de vetores, diminuir a taxa de formação de líquidos percolados, reduzir a exalação de odores, permitir o tráfego de

veículos coletores sobre o aterro e minimizar a liberação descontrolada de gases. Recomenda-se, ainda, a investigação do comportamento hidráulico dessas cinzas quando misturadas com diferentes proporções de solo, conforme a metodologia adotada em pesquisas anteriores (Elias; Soares; Souza, 2021; Lima, 2022).

Adicionalmente, a avaliação da permeabilidade das cinzas sob a aplicação de energia de compactação modificada se mostra relevante, visto que, neste estudo, foi utilizada exclusivamente a energia de Proctor normal. Conforme apontado por Soares (2012), a percolação de lixiviado em solo natural compactado com energia modificada pode ser até 100 vezes inferior àquela observada com compactação normal. A adição de diferentes percentuais de bentonita às cinzas aqui estudadas também constitui uma proposta válida para investigações futuras.

De acordo com Almeida e Schalch (2008), materiais com elevada permeabilidade ($K > 10^{-4}$ cm/s) devem ser evitados em camadas de base de aterros sanitários, por apresentarem maior propensão à infiltração de percolados e consequente risco de contaminação do lençol freático em curto prazo. Mesmo em situações em que a permeabilidade do solo é igual ou inferior a 10^{-6} cm/s, ou quando o lençol freático encontra-se a uma distância mínima de 1,5 metros da base do aterro, ainda é exigida a impermeabilização da base e a drenagem dos líquidos percolados (Martins, 2017).

É oportuno destacar que, em alguns países, a disposição final de cinzas de incineração em aterros sanitários é proibida (Tang; Florea; Brouwers, 2017). Em Singapura, por exemplo, verifica-se crescente interesse em soluções para a reutilização dessas cinzas, dada a escassez de áreas disponíveis para disposição final e de recursos naturais (Liu *et al.*, 2018).

Globalmente, observa-se um esforço para valorizar esses resíduos, minimizando sua destinação a aterros. Pesquisas têm explorado sua aplicação na geração de hidrogênio como forma de mitigar os impactos ambientais da incineração (Saffarzadeh; Arumugam; Shimaoka, 2016), além de sua incorporação na construção civil, como em camadas de pavimentação e base de estradas (Patra; Whaung; Kwan, 2017), na fabricação de cimento (Clavier *et al.*, 2019), em agregados para concreto (Li *et al.*, 2018), argamassas convencionais e adesivas (Aguilar *et al.*, 2002), cerâmicas vermelhas (Coutinho; Vieira, 2016) e misturas asfálticas (Zhu *et al.*, 2018).

A utilização de cinzas de incineração em novos processos produtivos pode proporcionar economia de recursos, evitando a extração de materiais naturais (Yin *et al.*, 2018). Por meio de processos hidrotérmicos, essas cinzas podem ser convertidas em fontes de minerais utilizáveis na construção civil, em substituição a agregados convencionais (Allegrini *et al.*, 2015; Hu *et al.*, 2015).

4 Conclusão

Este estudo teve como objetivo determinar a permeabilidade da Cinza da Incineração de Resíduos Sólidos Perigosos (CIRSP) à água e ao lixiviado proveniente do Aterro Sanitário Metropolitano de Fortaleza (CE), comparando seu desempenho ao do solo de cobertura utilizado no mesmo aterro.

A análise granulométrica indicou que, tanto o solo quanto as cinzas, enquadram-se como materiais arenosos bem graduados. Em relação ao teor de umidade, as cinzas apresentaram valores superiores aos do solo, embora ainda dentro da ampla faixa descrita na literatura. Quanto à densidade real, verificou-se que a CIRSP é menos densa que o solo, caracterizando-se como um material mais leve.

Observou-se que a permeabilidade da CIRSP à água foi superior à do solo em todas as frações granulométricas peneiradas. Essa diferença tendeu a diminuir nas frações mais finas (passantes na peneira de 0,075 mm e no fíler). De forma semelhante, a permeabilidade das cinzas ao lixiviado também se mostrou superior à do solo, com variações entre as campanhas, indicando influência temporal sobre os resultados, provavelmente decorrente de alterações nas características físicas e químicas das amostras, uma vez que os resíduos incinerados também variam ao longo do tempo.

Esses achados preliminares apontam que a CIRSP, nas condições em que foi amostrada e ensaiada, apresenta coeficiente de permeabilidade incompatível com os limites exigidos para camadas de base de aterros sanitários, conforme estabelece a NBR 13896/2007 (valores inferiores a 10^{-5} cm/s para ensaios com água). Para o lixiviado, fluido predominante no interior dos aterros, apenas dois

resultados da permeabilidade das cinzas atenderam aos requisitos, o que reforça a necessidade de investigações adicionais sobre o comportamento hidráulico do material, sobretudo quando misturado a diferentes proporções de solo.

Com base nos resultados obtidos, recomendam-se, para trabalhos futuros: i) a avaliação da permeabilidade das cinzas sob diferentes energias de compactação; ii) o estudo do comportamento hidráulico da CIRSP quando misturada a solos, bentonita e/ou cal, considerando que tais materiais contribuem para a redução da permeabilidade e o enrijecimento das camadas; iii) a investigação do potencial pozolânico da CIRSP, visando a novas possibilidades de aplicação.

Agradecimentos

Os autores gostariam de agradecer a empresa Marquise Ambiental pelo acesso ao incinerador e ao Aterro Sanitário, ao Laboratório de Mecânica dos Solos da Universidade Federal do Ceará (UFC) e ao Programa de Pós-Graduação em Tecnologia e Gestão Ambiental do IFCE campus Fortaleza.

Financiamento

Esta pesquisa teve o financiamento de uma bolsa por parte da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES).

Conflito de interesses

Os autores declaram não haver conflito de interesses

Nota (se aplicável; não deve ser numerada)

Este artigo é derivado de dissertação do curso de Mestrado em Tecnologia e Gestão Ambiental do IFCE campus Fortaleza: OLIVEIRA, S. M. **Estudo da permeabilidade das cinzas da incineração de resíduos perigosos à água e aos lixiviados de aterro sanitário**. 2025. Dissertação (Tecnologia e Gestão Ambiental) – Instituto Federal do Ceará, Fortaleza, 2025.

Contribuições ao artigo

SANTOS, G. O.: Elaboração e redação do manuscrito e supervisão geral e coordenação do projeto ou estudo. **OLIVEIRA, S. M.:** Concepção ou desenho do estudo/pesquisa e ensaios de laboratório. **LINO, T. L. L.:** Coleta, análise e/ou interpretação dos dados. **SILVA, R. A. C.:** Revisão crítica, com participação intelectual significativa e ensaios de laboratório. Todos os autores participaram da escrita, discussão, leitura e aprovação da versão final do artigo.

Referências

ABNT – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7181:** Solo – Análise granulométrica. Rio de Janeiro: ABNT, 2018.

ABNT – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 14545:** Métodos para determinação do coeficiente de permeabilidade à carga variável, com a água percolando pelo solo em regime de escoamento laminar. Rio de Janeiro: ABNT, 2021.

ABNT – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 10004:** Resíduos sólidos – Classificação. Rio de Janeiro: ABNT, 2024.

ABNT – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 13896:** Aterros de resíduos não perigosos – Critérios para projeto, implantação e operação. Rio de Janeiro: ABNT, 1997.

AGUIAR, B.; TABORDA, P.; AZEVEDO, A.; OLIVEIRA, R. Utilização de cinzas volantes de incineração de RSU. *In: SEMINÁRIO BETÃO PARA A CONSTRUÇÃO SUSTENTÁVEL*, 2002,

Lisboa. **Anais[...]**. Lisboa, 2002. Disponível em: <https://repositorium.sdum.uminho.pt/handle/1822/19219>. Acesso: 25 fev. 2025.

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, Part 5, p. 1566-1572, 2022. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2021.07.346>.

ALENCAR, V. L. L. **Caracterização geotécnica de solo estabilizado com cimento e cinzas de resíduos sólidos da saúde**. 2022. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil e Ambiental) – Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2022. Disponível em: <https://repositorio.ufrn.br/handle/123456789/49507>. Acesso: 25 fev. 2025.

ALLEGRINI, E.; VADENBO, C.; BOLDRIN, A.; ASTRUP, T. F. Life cycle assessment of resource recovery from municipal solid waste incineration bottom ash. **Journal of Environmental Management**, v. 151, p. 132-143, 2015. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2014.11.032>.

ALMEIDA, T. L.; SCHALCH, V. Avaliação da movimentação de líquidos contaminantes percolados nos poros do solo em locais de disposição de resíduos sólidos. In: SIMPÓSIO INTERNACIONAL DE QUALIDADE AMBIENTAL, 6., 2008, Porto Alegre. **Anais [...]**. Porto Alegre: ABES, PUC-RS, 2008. Disponível em: <https://aguassubterraneas.abas.org/asubterraneas/article/view/23367>. Acesso em: 02 jun. 2025.

ANDRADE, C. E. S. **Análise e caracterização de cinzas do processo de incineração de resíduos de serviço de saúde para reaproveitamento**. 2012. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química) – Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2012. Disponível em: <https://repositorio.ufmg.br/handle/1843/BUOS-95TFKK>. Acesso: 25 fev. 2025.

ANTUNES, I. S.; SANTOS, J. J. N.; AIRES, K. O.; GUEDES, M. J. F. Caracterização do solo e propriedades de fluxo da camada de cobertura de aterro sanitário de Campina Grande - PB. In: CONGRESSO NACIONAL DE ENSINO E PESQUISA EM CIÊNCIAS, 3., 2018, Campina Grande. **Anais [...]**. Campina Grande: Realize Editora, 2018. Disponível em: <https://www.editorarealize.com.br/artigo/visualizar/42994>. Acesso: 25 fev. 2025.

ARAÚJO, P. S.; ARAÚJO NETO, C. L.; SANTOS, J. J. N.; SOUSAR, B. A. Análise da viabilidade do uso de solo como material impermeabilizante em aterros sanitários. In: CONGRESSO NACIONAL DE ENSINO E PESQUISA EM CIÊNCIAS, 1., 2016, Campina Grande. **Anais [...]**. Campina Grande: Realize Editora, 2016. Disponível em: <https://www.editorarealize.com.br/artigo/visualizar/17785>. Acesso: 25 fev. 2025.

BASTOS, J. B. S.; LEITE, N. D.; QUEIROZ NETO, J. D. P.; SANTOS, G. O.; SILVA, R. A. C. Composição física e química das cinzas de fundo de um incinerador de resíduos sólidos perigosos. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA SANITÁRIA E AMBIENTAL, 31, 2021. **Anais [...]**. Curitiba: ABES, 2021. Disponível em: <https://icongresso.abes-dn.itarget.com.br/anais/index/resultado/index/index/cc/9>. Acesso em: 02 jun. 2025.

BRAGAGNOLO, L.; KORF, E. P.; MUSCOPE, F. P.; CONSTANTINO, R. S.; VARGAS, G. D. L. P.; KAIZER, R. R.; TORMEN, A. F. Caracterização de resíduo gerado por processo de lavagem de gases e avaliação de possíveis aplicações em construção civil. **Revista DAE**, v. 66, n. 209, p. 73-83, 2018. DOI: <http://dx.doi.org/10.4322/dae.2017.016>.

BRASIL. Presidência da República. Casa Civil. Subchefia para Assuntos Jurídicos. **Lei nº 12.305, de 02 de agosto de 2010**. Institui a Política Nacional de Resíduos Sólidos e dá outras providências.

Diário Oficial da União, Brasília, 2010. Disponível em: https://www.planalto.gov.br/ccivil_03/ato2007-2010/2010/lei/l12305.htm. Acesso: 25 fev. 2025.

CONAMA – Conselho Nacional do Meio Ambiente. **Resolução CONAMA 316**, de 29 de outubro de 2002. Dispõe sobre procedimentos e critérios para o funcionamento de sistemas de tratamento térmico de resíduos. Disponível em: <https://www.legisweb.com.br/legislacao/?id=98287>. Acesso: 25 fev. 2025.

CARARD, R. F. **Tratamento de lixiviado de aterro por ozonização fotocatalítica com TiO₂**. 2018. 165f. Dissertação (Mestrado em Inovações Tecnológicas) – Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Campo Mourão, 2018. Disponível em: <https://repositorio.utfpr.edu.br/jspui/handle/1/3772>. Acesso: 25 fev. 2025.

CARVALHO, J. L. V. **Avaliação do uso de cinzas de incineração de resíduos perigosos na produção de argamassa para concreto**. 2023. Tese (Doutorado em Metodologia da Ciência e Engenharia de Materiais) – Universidade Federal de Goiás, Catalão, 2023. Disponível em: <https://repositorio.ufcat.edu.br/items/1c9d6bc0-2de8-4ab5-9950-b1b178f7426c>. Acesso: 25 fev. 2025.

CARVALHO, J. L. V.; SILVA, A. C.; SILVA, E. M. S.; SOUSA, J. G. G. Caracterização físico-química de cinzas de resíduos perigosos para uso na construção civil. **Revista Matéria**, v. 27, n. 4, e20220139, 2022. DOI: <https://doi.org/10.1590/1517-7076-RMAT-2022-0139>.

CLAVIER, K. A.; WATTS, B.; LIU, Y.; FERRARO, C. C.; TOWNSEND, T. G. Risk and performance assessment of cement made using municipal solid waste incinerator bottom ash as a cement kiln feed. **Resources, Conservation and Recycling**, v. 146, p. 270-279, 2019. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2019.03.047>.

CORREIA, R. S. **Comportamento de pisos intertravados de concreto elaborados com frações de cinzas de resíduos sólidos perigosos**. 2022. Trabalho de Conclusão de Curso (Tecnologia em Gestão Ambiental) – Instituto Federal do Ceará, Fortaleza, 2022. Disponível em: https://ccc4d588-412d-4557-8af0-84fb8016f545.filesusr.com/ugd/5c0c96_88cce87273324e3eb2739bd998156bce.pdf. Acesso: 19 mai. 2025.

COSTA, M. D.; MARIANO, M. O. H.; ARAUJO, L. B.; JUCÁ, F. J. T. Estudos laboratoriais para avaliação do desempenho de camadas de cobertura de aterros sanitários em relação à redução de emissões de gases e infiltrações. **Engenharia Sanitária e Ambiental**, v. 23, n. 1, p. 77-90, 2018. DOI: <https://doi.org/10.1590/S1413-41522018160393>.

COSTA, W. W. M. L. **Estudo da permeabilidade em solos utilizados em camada de base de aterro sanitário no semiárido Paraibano**. 2019. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil e Ambiental) – Universidade Federal de Campina Grande, 2019. Disponível em: <http://dspace.sti.ufcg.edu.br:8080/xmlui/handle/riufcg/12673>. Acesso: 25 fev. 2025.

COUTINHO, N. C.; VIEIRA, C. M. F. Caracterização e incorporação de cinza de resíduo sólido urbano em cerâmica vermelha. **Cerâmica**, v. 62, p. 249-255, 2016. DOI: <https://doi.org/10.1590/0366-69132016623631985>.

DORNELLES, L. E.; ANTUNES, H. B.; SANGUEBUCHE, T. R.; VERAS, A.; PINHEIRO, R. J. B. Avaliação da condutividade hidráulica de um solo utilizado em aterro sanitário em santa maria através de ensaios de campo e de laboratório. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE MECÂNICA DOS SOLOS E ENGENHARIA GEOTÉCNICA, 18, 2016, Belo Horizonte. **Anais [...]**. Belo Horizonte: ABMS, 2016.

DOURADO, I. N. **Avaliação da aplicabilidade de cinzas de fundo de resíduo sólido urbano em camadas de pavimento.** 2013. Projeto de Graduação (Bacharelado em Engenharia Civil) – Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2013. Disponível em: <https://pantheon.ufrj.br/handle/11422/9534>. Acesso: 25 fev. 2025.

ELIAS, D. S.; SOARES, A. B.; SOUZA, H. P. Caracterização geotécnica de cinzas de carvão mineral e sua utilização como barreiras impermeabilizantes. **Revista Matéria**, v. 26, n. 3, e13005, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1590/S1517-707620210003.13005>.

ELIAS, D. S. **Caracterização de cinzas de carvão mineral e sua aplicação como barreira impermeabilizante.** 2018. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, CE, 2018. Disponível em: <https://repositorio.ufc.br/handle/riufc/37252>. Acesso: 19 mai. 2025.

GRAUPMANN, O.; MARTINS, M. A.; CONSUL, M.; CECHIN, L. Análise da resistência a compressão de concretos com adição de cinza de aterro sanitário. **Revista Matéria**, v. 24, n. 2, e12348, 2019. DOI: <https://doi.org/10.1590/S1517-707620190002.0663>.

GUPTA, G.; DATTA, M.; RAMANA, G. V.; ALAPPAT, B. J. MSW incineration bottom ash (MIBA) as a substitute to conventional materials in geotechnical applications: a characterization study from India and comparison with literature. **Construction and Building Materials**, v. 308, 1214925, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.124925>.

HU, Y.; ZHANG, P.; LI, J.; CHEN, D. Stabilization and separation of heavy metals in incineration fly ash during the hydrothermal treatment process. **Journal of Hazardous Materials**, v. 299, p. 149-157, 2015. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2015.06.002>.

LI, X. G.; LIU, Z. L.; LV, Y.; CAI, L.; JIANG, D. B.; JIANG, W. G.; JIAN, S. Utilization of municipal solid waste incineration bottom ash in autoclaved aerated concrete. **Construction and Building Materials**, v. 178, p. 175-182, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.05.147>.

LIMA, A. N. **Permeabilidade à água e ao lixiviado de misturas solo bentonita em aterro sanitário.** 2022. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil e Ambiental) – Universidade Federal de Campina Grande, 2022. Disponível em: <http://dspace.sti.ufcg.edu.br:8080/xmlui/handle/riufcg/28723>. Acesso: 25 fev. 2025.

LINO, T. L. L. **A incineração de resíduos sólidos perigosos em Fortaleza: um estudo de caracterização da composição das cinzas.** 2022. Monografia (Graduação em Tecnologia em Gestão Ambiental) – Instituto Federal do Ceará, Fortaleza, 2022. Disponível em: https://ccc4d588-412d-4557-8af0-84fb8016f545.filesusr.com/ugd/5c0c96_9b03373eac1e4f178a7906f15a12816b.pdf. Acesso: 19 mai. 2025.

LIU, Y.; SIDHU, K. S.; CHEN, Z.; YANG, E.-H. Alkali-treated incineration bottom ash as supplementary cementitious materials. **Construction and Building Materials**, v. 179, p. 371-378, 2018. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.05.231>.

MARTINS, L. A. **Influência da adição de bentonita em misturas alternativas para a utilização em barreiras impermeabilizantes de aterros sanitários.** 2017. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal do Espírito Santo, Vitória, 2017. Disponível em: <http://repositorio.ufes.br/handle/10/9500>. Acesso: 25 fev. 2025.

MENDONÇA, F. L. **Caracterização das cinzas de incineração de resíduos sólidos de serviços de saúde para inserção em ciclos produtivos e ambientais** 2018. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Ambiental) – Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2018. Disponível em: <https://repositorio.ufrn.br/handle/123456789/40729>. Acesso: 25 fev. 2025.

MOURA, M. C. C. **Avaliação do comportamento das cinzas da incineração de resíduos sólidos perigosos no tratamento de lixiviados de aterros sanitários**. 2023. Dissertação (Mestrado em Tecnologia e Gestão Ambiental) – Instituto Federal do Ceará, Fortaleza, 2023.

NASCENTES, R. **Estudo da mobilidade de metais pesados em um solo residual compactado**. 2006. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2006. Disponível em: <http://locus.ufv.br/handle/123456789/811>. Acesso: 26 fev. 2025.

OLIVEIRA, C. A. A. **Análise do fluxo de gases na camada de cobertura do Aterro Sanitário Municipal Oeste de Caucaia (ASMOC)**. 2011. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2011. Disponível em: <https://repositorio.ufc.br/handle/riufc/2535>. Acesso: 25 fev. 2025.

PATRA, S.; WHAUNG, S. T.; KWAN, W. L. Analysis of heavy metals in incineration bottom ash in Singapore and potential impact of pre-sorting on ash quality. **Energy Procedia**, v. 143, p. 454-459, 2017. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2017.12.710>.

PINTO, B. H. A. **Estudo de argamassas com adição de cinzas do processo de incineração de resíduos sólidos dos serviços de saúde**. 2018. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Civil) – Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2018. Disponível em: <https://repositorio.ufrn.br/handle/123456789/40449>. Acesso: 25 fev. 2025.

SAFFARZADEH, A.; ARUMUGAM, N.; SHIMAOKA, T. Aluminum and aluminum alloys in municipal solid waste incineration (MSWI) bottom ash: a potential source for the production of hydrogen gas. **International Journal of Hydrogen Energy**, v. 41, n. 2, p. 820-831, 2016. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2015.11.059>.

SILVA, M. L. **Caracterização física de solos de cobertura e de resíduos sólidos do aterro sanitário metropolitano oeste de Caucaia**. 2022. Dissertação (Tecnologia e Gestão Ambiental) – Instituto Federal do Ceará, Fortaleza, 2022.

SILVA, M. L.; LANGE, L. C. Caracterização das cinzas de incineração de resíduos industriais e de serviços de saúde. **Química Nova**, v. 31, n. 2, p. 199-203, 2008. DOI: <https://doi.org/10.1590/S0100-40422008000200002>.

SILVA, R. B. L.; SANTOS, G. O. Caracterização físico-química preliminar dos efluentes da incineração de resíduos perigosos de Fortaleza-CE. **Revista Conexões - Ciência e Tecnologia**, v.13, n. 3, p. 61-71, 2019. Disponível em: <https://conexoes.ifce.edu.br/index.php/conexoes/article/view/1285>. Acesso: 19 mai. 2025

SILVEIRA, P. H. T. T.; CASAGRANDE, M. D. T.; QUISPE, C. C. **Aplicabilidade de resíduos em obras geotécnicas: estudo experimental de misturas de solo e cinza volante de resíduo sólido urbano**. Relatório de Iniciação Científica. Rio de Janeiro: Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Graduação em Engenharia Civil, 2013. Disponível em: https://www.puc-rio.br/ensinopesq/ccpg/pibic/relatorio_resumo2013/relatorios_pdf/ctc/CIV/CIV-Paula%20Helene%20Torald%20Teixeira%20Silveira.pdf. Acesso: 22 de mai. 2025.

SINGH, A.; ZHOU, Y.; UPTA, V.; SHARMA, R. 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**, v. 17, e01434, 2022. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2022.e01434>.

SOARES, A. B. **Estudo da resistência de concretos com diferentes teores de cinzas da incineração de resíduos sólidos perigosos**. 2025. Dissertação (Mestrado em Tecnologia e Gestão Ambiental) – Instituto Federal do Ceará, Fortaleza, 2025.

TANG, P.; FLOREA, M. V. A.; BROUWERS, H. J. H. Employing cold bonded pelletization to produce lightweight aggregates from incineration fine bottom ash. **Journal of Cleaner Production**, v. 165, p. 1371-1384, 2017. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.07.234>.

SOARES, V. **Utilização de mistura de solo saprolítico com bentonita na construção de revestimento de fundo de aterros sanitários**. 2012. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2012. DOI: <https://doi.org/10.11606/D.3.2011.tde-19112012-113651>.

VIANA, J. A. **Estimativa da quantidade de resíduos de serviços de saúde (RSS) incinerada por nove hospitais públicos de Fortaleza**. 2013. Trabalho de Conclusão de Curso (Tecnologia em Gestão Ambiental) – Instituto Federal do Ceará, Fortaleza, 2013.

VIZCARRA, G. O. C. **Aplicabilidade de cinzas de resíduo sólido urbano para base de pavimentos**. 2010. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2010. DOI: <https://doi.org/10.17771/PUCRio.acad.16327>.

YIN, K.; CHAN, WEI-PING.; DOU, X.; LISAK, G.; CHANG, V. WEI-CHUNG. Co-complexation effects during incineration bottom ash leaching via comparison of measurements and geochemical modeling. **Journal of Cleaner Production**, v. 189, p.155-168, 2018. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.03.320>.

YVON, J.; ANTENUCCI, D.; JDID, E.-A.; LORENZI, G.; DUTRE, V.; LECLERQ, D.; NIELSEN, P.; VESCHKENS, M. Long-term stability in landfills of municipal solid waste incineration fly ashes solidified/stabilized by hydraulic binders. **Journal of Geochemical Exploration**, v. 90, n. 1-2, p. 143-155, 2006. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.gexplo.2005.09.008>.

ZHU, W.; CHEN, X.; STRUBLE, L. J.; YANG, E.-H. Characterization of calcium-containing phases in álcali-activated municipal solid waste incineration bottom ash binder through chemical extraction and deconvoluted Fourier transform infrared spectra. **Journal of Cleaner Production**, v. 192, p. 782-789, 2018. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.05.049>.